علم الصوتيات

تأليف

ليو أل. بيرانيك

ترجمة

ا.د/ يسرى مصطفى
أستاذ فيزياء الجوامد
كلية العلوم بصبراته

د/ محمد التوهامى
أستاذ مساعد فيزياء الصوتيات
كلية العلوم بصبراته

جامعة السابع من أبريل

2009

علم الصوتيات

تأليف

ليو أل. بيرانيك

ترجمة

أ.د / يسرى مصطفي
أستاذ فيزياء الجوامد
كلية العلوم بصبراته - جامعة السابع من أبريل

د / محمد التوهامى
أستاذ فيزياء الصوتيات المساعد
كلية العلوم بصبراته - جامعة السابع من أبريل

جامعة السابع من أبريل

2009

مقدمة الطبعة الأولى

إن علم الصوتيات هو موضوع ساحر. الموسيقى، الهندسة المعمارية، علم الهندسة، المسرح، الطب، علم النفس، وعلوم اللغة، الكل يبحث عن إجابات على الأسئلة الأساسية المتعلقة بكل مجال. في معامل الصوتيات من الممكن أن يقوم الطلاب بالعمل على حل مثل هذه المشاكل المختلفة مثل تصميم صالة تسجيل أو إستوديو، أو سماعة، توليد وتسجيل الأصوات المعقدة، توليد أصوات صناعية، توليد الصوت في الخ، إنتقال الصوت في السوائل، تخفيض الضوضاء الناتجة عن محركات الطائرات النفاثة، والكشف بالموجات فوق الصوتية عن الأورام الدماغية.

إن الاهتمام بعلم الصوتيات يوفر اليوم فرص كثيرة للعمالة لأن الإدارات في مجال الصناعة أدركت المساهمات المهمة وعرفت أن علم الصوتيات يؤدى إلى تحسينات الإنتاج وإلى تحسين شروط عمل المستخدم.

لا يوجد طريق سهل لفهم علم الصوتيات الحالى. في البداية يجب أن يلم الطالب بالمصطلحات الخاصة بهذا المجال. ثم بعد ذلك، يجب أن يستوعب القوانين التى تحكم انتقال الصوت وانبعاث الصوت والرنين وسلوك محولات الطاقة في الأوساط الصوتية. لكن، بالتأكيد ولا يقل أهمية عما سبق هو أن الطالب يجب أن يتعلم سمات السمع عند الناس وتفاعل المستمعين مع الأصوات والضوضاء.

هذا الكتاب هو نتاج مقرر الصوتيات الذي قام المؤلف بتدريسه لطلاب السنوات الأخيرة وطلاب السنة الأولى من الدراسات العليا لفيزياء الاتصالات والهندسة الكهربية. في الجزء الأول من هذا الكتاب تم مناقشة المعادلة الأساسية للموجة وبعض حلولها الشيقة بشيء من التفصيل. كما تم معالجة إشعاع الصوت

ومكونات الأنظمة الصوتية، الميكروفونات، السماعات الصوتية، والأبواق بتفصيل كافي لإتاحة الفرصة أمام الطلاب الجادين لدخول مجال التصميم الكهروصوتي.

توجد معالجة شاملة لمشاكل مهمة مثل الصوت في المرافق، طرق تخفيض الضوضاء، السمع، وضوح الكلام، ومعايير الراحة النفسية للصوت، ووضوح الكلام المقبول، وشروط الاستماع الممتع.

يختلف هذا الكتاب عن العديد من الكتب الأخرى في أنه يؤكد على التطبيقات العملية لنظرية الدائرة الكهربية في حل العديد من المسائل المتنوعة. وحيثما كان ممكنا، تم استخدام خلفية هندسة الكهرباء وفيزياء الاتصالات في شرح المبادئ الصوتية.

سوف يجد الدارس خبرة تتميز بالأمانة الشديدة في الأبواب المتعلقة بالسماعات الصوتية في الأوعية المغلقة، الأبواق، والحجرات والتى تكون ممتعة بوجه خاص لأنها تبين كيفية أداء السماعات سواء كان أداء سماعات ضاغطة أو مرفقة بأبواق والأخذ في الاعتبار أيضا الحجرة التى يتم التشغيل فيها. تم إعطاء أمثلة عددية ورسوم بيانية لتسهيل تطبيق هذه المواد في أنظمة إعادة توليد الموسيقى.

نظرا للاهتمام المتزايد في مجال السيطرة على الضوضاء، لم يغفل المؤلف هذا الموضوع في كتابة الأبواب 1, 2, 4، و10 إلى 13. تم اعتبار هذه الأبواب أساس البرنامج الصيفي لتخفيض الضوضاء في معهد ماسشوتس للتكنولوجيا (M.I.T.) عام 1953. إن مواد الأبواب 11 و13 مواد جديدة تمت إضافتها إلى هذه الطبعة، ومن المأمول أنها ستكون مفيدة للمهتمين بالضوضاء وتأثيرها على الإنسان. باختصار، بالنسبة للمهندس أو الفيزيائى الذي يأمل أن يتدرب في مجال الصوتيات والذي لا

ينوى حصر جهوده في الأمور النظرية يجب أن يعرف مادة هذا الكتاب.

في نهاية كل باب تم وضع مسائل للدارس، كما تم إعطاء مراجع باللغة الإنجليزية تتعلق بالمواد المدروسة، علاوة على الاقتراحات المقدمة للمدربين والقائمين على التدريس بغرض الحصول على أفضل استعمال للنص مباشرة بعد هذه المقدمة.

يود المؤلف أن يوجه الشكر لكل من فرانسيس وينير، رودولف نيكولس على المساعدة في المراجعة التفصيلية للنص وعلى إعداد بعض المواد، وكذلك للعديد من أعضاء معمل الصوتيات في الـM.I.T للمساعدة المثمرة. من بينهم أخص بالذكر مارى انى سمرفيلد، والتر أ. روزينبليث، كنيث أن ستيفينز، جيروم أر كوكس، جوردان جى باروش، جوانى جى انجليش، ونورمان دويلنج.

جاءت الرسومات بسبب الجهود القادرة جدا والمثابرة لكلار توارديزيك. كما يدين المؤلف بالشكر العميق إلى لكاتبة الآلة الكتابة، إليزابيث إتش. جونز، وسكرتيرته، ليديا بونزاولى، وزوجته، فيليس، التي جعلت الأمر محتملا له لإكمال النص خلال فترة زمنية قصيرة إلى حد معقول.

المؤلف

ليو أل. بيرانيك

اقتراحات للمساعدين والقائمين على التدريس

يحتوي هذا الكتاب على 13 باب مقسمة إلى 32 جزء. يخصص كل جزء تقريبا لأسبوع دراسي واحد، بالرغم من تفاوت هذا بين الطلاب بسبب الاختلافات في تدريباتهم السابقة.

في حالة تدريس مقرر علم الصوتيات في عام دراسي كامل، فإن جميع الأجزاء يجب أن تدرس بالترتيب، باستثناء الجزء الثامن والعشرون (مقياس المستويات الصوتية)، حيث يتم تدريسه في التجارب والعروض المعملية الموزعة على كافة أنحاء المقرر. وفي حالة توزيع المقرر على فصلين دراسيين، فإن المواضيع الأساسية يتم تدريسها في الفصل الدراسي الأول، بينما يتم تدريس المواضيع الأكثر تطبيقا في الفصل الثاني. في هذه الحالة نقترح التقسيم التالي:

الفصل الدراسي الأول

الجزء الأول – مقدمة

الجزء الثانى - مصطلحات

الجزء الثالث - معادلة الموجة

الجزء الرابع - حلول معادلة الموجه

الجزء السادس - الدوائر الميكانيكية

الجزء السابع - الدوائر الصوتية

الجزء الثامن - محولات الطاقة

الجزء العاشر - نماذج التوجيه

الجزء الثاني عشر - معاوقة الإشعاع

الجزء الثالث عشر - العناصر الصوتية

الجزء السابع عشر - النظرية الأساسية لسماعات المشعاع المباشر

الجزء الخامس والعشرون - انتقال الصوت خلال الجدران بين المرافق

الجزء السادس والعشرون - مصادر الضوضاء وطرق السيطرة عليها

الجزء الرابع والعشرون - مجالات الصوت في الأوعية المنتظمة الشكل الكبيرة

الجزء الثامن والعشرون - قياس مستويات الصوت

الجزء الثلاثون - السمع

الفصل الدراسي الثانى

الجزء الخامس- كثافة وشدة الطاقة
الجزء التاسع- نظرية الدائرة، الطاقة والقدرة

الجزء الحادى عشر- مؤشر ومعامل التوجيه

الجزء الرابع عشر-السمات العامة للميكروفونات

الجزء الخامس عشر- ميكروفونات الضغط

الجزء السادس عشر- ميكروفونات الميل والمجموعة

الجزء الثامن عشر- عوامل التصميم التى تؤثر سماعات المشعاع المباشر

الجزء التاسع عشر- المرافق البسيطة

الجزء العشرون- مرافق الانعكاس التمييزى للذبذبات

الجزء الحادى والعشرون- الوحدات الدافعة للأبواق

الجزء الثانى والعشرون – الأبواق

الجزء الثالث والعشرون- مجالات الصوت في الأوعية الصغيرة المنتظمة الشكل

الجزء السابع والعشرون- مسارات إنتشار الصوت

الجزء التاسع والعشرون- معايرة تبادل محولات الطاقة

الجزء الحادى والثلاثون- وضوح الكلام

الجزء الثانى والثلاثون- المعايير الصوتية النفسية

يجب أن يلحق مقرر الصوتيات بمجموعة من التجارب المعملية المخططة بشكل جيد. فعلى سبيل المثال، المادة المقدمة في الأبواب الأولى سوف تكون مهمة إذا تم إتباعها بتجربة على قياس الضوضاء. إن هذا سوف يعود الطالب على قياس ضغط الصوت وعلى استعمال محلل التردد. كما سوف يعرف أكثر المعنى الكامل للضغط، كثافة الصوت، الديسيبل، كثافة الطاقة، ومستوى القدرة، وسيفهم الدقة التى يمكن بواسطتها قياس الضوضاء.

فيما يلي، قائمة بالحد الأدنى من التجارب (عشر تجارب) موزعة على الفصلين الدراسيين على النحو التالى:

الفصل الدراسي الأول

التجربة رقم 1 قياس الضوضاء.
التجربة رقم 2 قياس ثوابت محول الطاقة الكهروميكانيكي.
التجربة رقم 4 قياس استجابة المجال الحر لسماعة الصوت.
التجربة رقم 6 دراسة مجالات الصوت في الأوعية المنتظمة الشكل الصغيرة.
التجربة رقم 7 دراسة مجالات الصوت في الأوعية الكبيرة.

الفصل الدراسي الثاني

التجربة رقم 3 معايرة المجال الحر للميكروفونات.
التجربة رقم 5 تصميم وفحص السماعات الضاغطة.
التجربة رقم 8 توقع والتحكم في ضوضاء أنظمة التهوية.
التجربة رقم 9 فحص القياس الصوتي للسمع.
التجربة رقم 10 تطبيقات التأثير الصوتي النفسي للصوت في تصميم صالات الاستماع.

يجب إعطاء مهمة واجب تتكون من مسألتين كل أسبوع وهذا يعتبر تطبيقاً كافيا للمادة العلمية. القائمة القصيرة للمسائل الخاصة بكل فصل يجب أن تقدم للطالب في الوقت المناسب بواسطة القائم على التدريس أو بواسطة المساعد.

مقدمة الطبعة الثانية

بوصــول القرص المضــغوط، مع أنظمة الجودة العالية الصــغيرة المحمولة في كل مكان، وبالتأكيد مجموعة الصــوت والبيانات الرقمية حول العالم وشــبكات الهاتف، أصــبحت الكهروصــوتيات اليوم موضــوع أكثر حيوية من ثلاثة عقود سابقة.

إن جوهر علم الصوتيات، وهو ثلاثة أرباع النص، الجزء 1ـ24، ما يزال صالحا. تتضمن هذه الأجزاء أســاســيات الصــوت، مبادئ الدوائر الكهروـميكانوـ صــوتية، إشــعاع الصوت، العناصر الصوتية، الميكروفونات، السماعات وأوعيتها والصوت في الغرف. ومع ذلك، تزايدت المراجع حول الميكروفونات والســماعات والغرف عدة مرات عما كانت منذ نشــر الطبعة الأولى. في الملحق III تم تجميع كل الكتب والمراجع المختارة، على مختلف المســتويات الفنية، والانجازات المؤدية للاتجاهات الموجودة اليوم. لقد اخترت ألا أدرج كل مقالة منشــورة بل تضــمين المراجع باللغة الأجنبية وكان الغرض هو إعطاء مصادر للقراءة باللغة الانجليزية.

في الأصــل، كانت رغبة المؤلف هى مســاعدة الطالب، والمهندس، وخبير الصــوتيات وتصور أفضل لتصميم نظام صوتى لتحقيق الهدف الصعب وهو إعادة إنتاج صوت عالي الجودة. الوسط الذي اخترته لتحقيق ذلك هو الدوائر التخطيطية، المناظرة لتلك المســتخدمة في مجال الإلكترونيات، بحيث تختلف عن المراجع الســابقة وذلك عن طريق الجمع بين المكونات الكهربية، الميكانيكية والصوتية في مخطط واحد، وتضــمين عملية التحويل والاتصــال فيما بينها. يبدو أن فحص المراجع يدل على نتيجة واحدة لذلك المجهود وهي لمحاكاة تطوير أوعية الســماعة الصــوتية، والتي في اغلب المواضع تم استبدالها بصناديق السماعة المنخفضة التردد (الويفر).

جزء كبير من الكتاب السابقين الذين كتبوا عن تصميم نظام السماعة الصوتية في الخمسة عشر سنة الأخيرة يتضمن إى أم فيلشور، أ. إن ثايليى، إر إتش سمال، جى أر أشلى، أ. دى برودهورست، أس موريتا، إن كيونو، أ. إل كارمنسكى، جى ميرهاوت، أر إف أليزون و أخرون، قد استخدموا الأبواب المتوسطة من هذا الكتاب كنقطة بداية. بمعنى أخر، إن المبادئ المدروسة هنا كانت واجهة لتقدمهم.

أنا لا احتفظ بأي ملخص للأبواب من الباب 11 حتى الباب 13، والتي تعني بالتحكم في الضوضاء والاهتزاز (MCGRAW-HILL, NEW YORK, 1971)، حيث تم معالجة هذه المادة بتفصيل أكثر خلال ما يقرب من 20 عام في هذا المجال. إن المهندس المهتم بتحكم الضوضاء ربما يأخذ في الاعتبار "التحكم في الضوضاء والاهتزاز" كجزء أول وجزء ثاني في الموضوع. تم تدوين المراجع الإضافية في تحكم الضوضاء للخمسة عشر عام الماضية، والكثير منها دون في الملحق III في هذه الطبعة، وهي لا تعتبر كم هائل للمطالعة. أخيرا، قمت بتصحيح كل الأخطاء المعروفة في الكتاب.

أود أن أشكر جمعية الصوت الأمريكية لاهتمامها بطباعة هذا الكتاب.

أتمنى ثقتهم في أن هذا الجزء من مراجع الصوت يكون بمثابة المساعدة التي قد يوفر للطلاب والمهندسين التعلم والتدريب في مجال الكهروصوتيات.

ليو إل. بيرانيك

1986

شكر المترجمون

يود المترجمون أن يوجهوا الشكر في الأساس إلى ليو إل. بيرانيك مؤلف هذا الكتاب والذي يعتبر من أمهات الكتب في هذا المجال. كما نود تقديم خالص الشكر لجمعية الصوت الأمريكية (ASA) للسماح بترجمة هذا الكتاب وكذلك اهتمامها بمجال الصوتيات في كل العالم. تمت الترجمة والنشر بموجب الترخيص من جمعية الصوت الأمريكية بتاريخ 2009/2/30 لصالح جامعة السابع من أبريل.

نأمل بترجمة هذا الكتاب أن نكون قد سددنا فراغ في المكتبة العربية وان نكون قد مددنا يد المساعدة لأبنائنا الطلاب في كليات الهندسة والعلوم والمعاهد الفنية المتخصصة، وأن يكون هذا المجهود المتواضع في ميزان حسناتنا، وعلى الله قصد السبيل

المترجمون

أ.د/ يسرى مصطفي

د/ محمد التوهامي

2009

جدول المحتويات

الباب الأول

مقدمة ومصطلحات

INTRODUCTION AND TERMINOLOGY

الجزء الأول – تقديم

1-1 لمحة تاريخية A little History

يدخل علم الصوتيات عصرا جديدا، إنه عصر الهندسة الدقيقة. من مائة عام مضت، كان علم الصوتيات فن من الفنون. وقديماً، كان المهندسون يستخدمون آذانهم بالدرجة الأولى فى قياس الآلات فى هذا المجال. لقد قاموا بالتحكم فقط فى مصادر الضوضاء المتوفرة والتى كانت عبارة عن الصافرات، الأجراس، وصفّارات إنذار. فى ذلك الوقت، كان الميكروفون يتألف من غشاء متصل إلى خادش ميكانيكي (scratcher) يسجل شكل الموجة على الوجه المدخن لطبلة دائرة والذي يتغير ارتفاعه مع ضغط الصوت. فى هذا الزمن، ظهرت أسماء مثل رايليى (Rayleigh)، ستوكس (Stokes)، طومسن (Thomson)، لامب (Lamb)، هيلمهولتز (Helmholtz)، كونيج (Konig)، توندال (Tyndall)، كوندت (Kundt) وآخرون فى أوراق بحثية مهمة منشورة. لقد توجت مساهماتهم فى فيزياء الصوت بنشر اللورد رايليى لنظرية الصوت فى بحث مكون من جزئين فى عام 1877 وعام 1878. بعد ذلك، هدأ العمل في هذا المجال حتى جاء العالم سابين (W.C. Sabine) بسلسلة من الأوراق البحثية أدت إلى رفع مرتبة الصوت المعماري إلى منزلة العلم.

بالرغم من أن مساهمات هؤلاء العلماء القدامى كانت عظيمة، إلا أن التسارع الأعظم للاهتمام بهذا المجال جاء بعد اكتشاف دوائر الصمام المفرغ الثلاثى فى عام 1907 واكتشاف البث الإذاعى فى عام 1920. بواسطة مكبرات الأنابيب المفرغة المتاحة، تمكن العلماء من توليد أصوات عالية بأى تردد مرغوب، وقياس شدة الأصوات الضعيفة جداً. وفوق كل هذا، فقد أصبح من السهل بناء آلات القياس التى كانت مدمجة، ومتينة، وغير حساسة لتيارات الهواء.

لقد تسارع التقدم فى مجال الصوتيات فى الاتصالات بواسطة مجهودات مختبرات بيل للتليفون (عام 1920) وذلك عن طريق تطوير نظام التليفون الحديث فى الولايات المتحدة.

بشكل أساسى، استمد مجال الصوت المعمارى القوة من النظريات والتجارب المعملية التى خرجت من جامعة هارفارد، ومعهد ماسشوتس للتكنولوجيا، وجامعة كاليفورنيا فى لوس أنجلوس (1930-1940)، وكذلك من العديد من المراكز البحثية فى إنجلترا وأوروبا وخاصة ألمانيا.

فى هذه الفترة، تم تفسير اضمحلال الصوت فى الحجرات المربعة الشكل بالتفصيل، كما تم بيان أن طريقة المعاوقة لتحديد المواد الصوتية هي طريقة مفيدة، كما تم وضع طريقة لحساب اضمحلال الصوت فى القنوات على أساس دقيق. كما تم عرض فوائد الحوائط المائلة واستخدام مواد صوتية على هيئة رقع بدلا من وضعها على كامل الجدار. كذلك تم إدخال الممتصات الوظيفية إلى مجال الصوتيات، وتنوع كبير من المواد الصوتية إلى السوق.

لقد تم تطوير علم الصوتيات النفسى أيضاً. ففى مختبرات بيل للتليفون، وتحت القيادة الرائعة لهارفى فليتشر (Harvey Fletcher)، تم تحديد الصخب والحجب وتعيين الكثير من العوامل التى تتحكم فى عملية الاتصال الكلامى الناجحة (1920-1940). دخل علم الصوت، من خلال الفوقصوتيات، إلى المجال الطبى ومجال الكيمياء. وتم تسجيل بدأ تجريب التسخين بالموجات الفوقصوتية فى العلاج الطبى، وتعجيل التفاعلات الكيميائية بواسطة الموجات الفوقصوتية.

وأخيراً، جاءت الحرب العالمية الثانية بمطالبها الملحة فى الكشف الناجح للغواصات تحت الماء وتحقيق الاتصال الخطابى الموثوق جدا، خاصة في البيئات المليئة بالصخب الناتج عن الطائرات والسيارات المدرعة. وقد تم إنشاء المختبرات الكبيرة فى كل من إنجلترا، وألمانيا، وفرنسا، وفى الولايات المتحدة الأمريكية فى جامعة كولومبيا، وهارفارد، وجامعة كاليفورنيا للتعامل مع هذه المشاكل. وصل البحث في علم الصوتيات فى بضع سنوات إلى معدلات لم يحلم بها من قبل وذلك نتيجة استمرار العمل الدؤوب.

اليوم، يمر علم الصوتيات من مرحلة كونه أداة لصناعة التليفون، وبضعة تصاميم مشرقة، وأداة فى الجيش إلى كونه شيئاً مهماً في الحياة اليومية لكل شخص تقريباً. تعمل الحركات الدولية فى تشريع القوانين وتزويد المواطنين بسكن هادئ. كما يطالب الموظفون والعمال ببيئات سمعية آمنة ومريحة في أماكن عملهم. كما يتزايد طلب المصممين المعماريين على توظيف خدمات مهندسي الصوت كجزء روتيني فى عملية تصميم البنايات. بالإضافة إلى هذا، هناك الحاجة الأكثر عمومية لوضع حد للتهديد الكبير من ضوضاء الطائرات، خاصة النفاثة منها، والى تعتبر تخريب لراحة بيوتنا. يستخدم المصنعين أدوات صوتية فى خطوط إنتاجهم. إن علم الصوتيات يدخل إلى غرفة المعيشه الخاصة،

حيث تجد عملية إعادة انتاج الموسيقى ذات المستوى العالي جمهور عريض.

يغطى هذا الكتاب بشكل مبدئى السمات الأساسية لعلم الصوتيات: انتشار الصوت فى الهواء، نظرية الدوائر الميكانيكية والصوتية، إشعاع الصوت إلى الفضاء الحر، وخصائص المكونات الصوتية. بعد ذلك، تأتى أبواب تتعلق بالميكروفونات، السماعات، مرافق السماعات، والأبواق. بعد ذلك تمت معالجة المفاهيم الأساسية للصوت فى المرافق، وإعطاء المعلومات التجريبية للتحكم فى الضوضاء. خلال كل الكتاب، سوف نخاطبك أنت (طالب هذا المجال الشيق والحديث).

2-1 ما هو الصوت؟ What is sound?

عند قراءة المادة التالية، يجب أن يكون هدفك هو تكوين صورة فى ذهنك وتذكر إن ما يحدث لغشاء السماعة (الرق)، أو أي سطح أخر هو عبارة عن عملية اهتزاز (تذبذب) متصلة بالهواء.

يقال أن الصوت يكون موجود إذا سبب انتشار الاضطراب خلال المادة المرنة تغير فى الضغط أو سبب ازاحه لجزئيات المادة التى يمكن رصدها بواسطة شخص أو بواسطة آلة. وحيث أن هذا النص يهتم بالدرجة الأولى بالأدوات التى تتناول الكلام أو الموسيقى، فإن الغازات (خصوصاً الهواء) ستكون هى نوع المادة المرنة التى نحصر اهتمامنا فيها. ولحسن الحظ، من السهل التعبير عن الخصائص الفيزيائية للغازات ويمكن وصف طبيعة انتشار الصوت فى مثل هذا الوسط بسهولة ويسر.

تخيل أننا نستطيع قطع مكعب (صندوق) صغير جداً من الهواء ومسكناه فى أيدينا كما لو كان قطعة من الخشب. ما هي الخصائص الفيزيائية التى سوف يظهرها هذا المكعب؟ أولاُ، سوف يكون له وزن وبالتالى يكون له كتلة. فى الحقيقة، للمتر المكعب من الهواء كتلة تزيد بقليل عن كيلوجرام واحد. إذا تم تطبيق قوة على الصندوق فإنه سوف يعجل طبقاً لقانون نيوتن الثانى، والذي ينص على أن هذه القوة تساوى حاصل ضرب الكتلة فى العجلة.

عندما نمارس قوى ضغط على الجانبين المتقابلين للمكعب الصغير، فإن الجوانب الأخرى الأربعة ستنتفخ للخارج، وسيكون الضغط المتزايد المتولد في الغاز بواسطة هذه القوة واحداً في كافة أنحاء هذا الحجم الصغير. نحصل على هذا لأن الضغط في الغاز يكون كمية قياسية، وبمعنى آخر، كمية غير متجهة.

تخيل أن صندوق الهواء الصغير ممسكوك بأحكام بين يديك. ومع استمرار مسك الصندوق، ادفع

إحدى اليدين إلى الأمام لتحاول تغير شكل الصندوق من المكعب إلى متوازى سطوح. سوف لا تجد أى قوة من الهواء خارج الجانبين المشوهين تعارض تشويه الصندوق. هذا يشير إلى أن الهواء لا يدعم قوة القص. (يكون هذا حقيقى تقريباً، حيث أن للهواء لزوجة، لكن تكون قوى القص صغيرة جداً مقارنة مع قوى القص فى المواد الصلبة)

أكثر من ذلك، عندما نضغط على خمسة جوانب من المكعب ونحاول إزاحة الوجه السادس، فإننا نجد أن الغاز مرن، بمعنى آخر، تلزم قوة لضغط الغاز. يتناسب مقدار القوة تناسب طردى مع إزاحة الوجه الحر (غير المضغوط) للإناء. إن التجربة البسيطة ستقنعك بذلك. بعد نفخ إطار السيارة، قم بنزع خرطوم المضخة لكي يبقى الهواء محصور في الإطار. عند الضغط على الكباس الغاطس (الصمام)، ستجد ان الهواء المحصور يتصرف كسلك زنبركى بسيط.

لكن، يتغير ثابت زنبرك الغاز مع طريقة الضغط. تسبب القوة التى تضغط الغاز أساساً إزاحة لجزيئات الغاز، ويتناسب الضغط المتزايد فى الغاز تناسبا طرديا مع التغير المتزايد فى الحجم. عندما تتم الإزاحة بشكل بطيء، فإن التغير فى الضغط يكون على الصورة،

$$\Delta P = -K\ \Delta V$$

حيث K ثابت. على الجانب الأخر، إذا تمت الإزاحة، وبالتالى التغير فى الحجم بشكل سريع، وعلاوة على ذلك، إذا كان الغاز هواء، أكسيجين، أو هيدروجين، أو نيتروجين (الغازات الثنائية الذرة)، فإن الضغط المزايد المتولد يساوى $1.4K$ مرة قدر التغير فى الحجم، أى أن

$$\Delta P = -1.4K\ \Delta V$$

ما سبب الفرق بين الضغط الناشئ من تغير الحجم بسرعة والضغط الناشئ عن تغير الحجم ببطيء؟

فى حالة التغيرات البطيئة للحجم تكون الإنضغاطات أيزوثيرمالية. والمقصود بالتغير الأيزوثيرمالى هو أن التغير يحدث عند درجة حرارة ثابتة، أى أنه يوجد وقت كافى لكي تتدفق الحرارة المتولدة أثناء الانضغاط إلى الأجزاء الأخرى للغاز، إذا كان الغاز محصورا فى وعاء، إلى الوسط المحيط خلال جدران الوعاء. بالتالى تبقى درجة حرارة الغاز ثابتة. لكن، فى حالة التغيرات السريعة للحجم، ترتفع درجة حرارة الغاز عند انضغاطه وتهبط عند تمدده، ولا يوجد وقت كافى خلال دورة الانضغاط والتمدد لكي تهرب الحرارة المتولدة الى الوسط المحيط. تسمى مثل هذه التغيرات السريعة بأنها تغيرات أديباتيكية.

فى أى من العمليات الأيزوثيرمالية أو الأديباتيكية، يكون الضغط داخل الغاز ناشئ عن تصادمات جزيئات الغاز مع جدران الوعاء. سوف تتذكر أن الضغط هو القوة لكل وحدة مساحة، ومن قوانين نيوتن، هو معدل تغير الزخم لوحدة المساحة. دعنا نفحص آلية تغير هذا الزخم فى الغاز المحصور. يغير جدار الوعاء اتجاه حركة الجزيئات التى تصطدم به وبالتالى تغير زخمها. يظهر هذا التغير على هيئة ضغط على الغاز. يعتمد المعدل الذي يحدث به تغير الزخم، (وبالتالى مقدار الضغط)، على كميتين. يزداد المعدل بشكل واضح مع زيادة عدد التصادمات بين جزيئات الغاز والجدار فى الثانية الواحدة، أو عندما تصبح كمية الزخم المنقول فى كل تصادم أكبر، أو مع كليهما. نرى الأن أن الانضغاط الأيزوثيرمالى للغاز يؤدى إلى زيادة فى الضغط لأن عدد الجزيئات المعطى يجبر على احتلال حجم أصغر وأنه هذا العدد سوف يتصادم مع الجدار بشكل أكثر من الأول.

على الجانب الأخر، بالرغم من أن الإنضغاط الأديباتيكى للغاز يؤدى إلى زيادة عدد التصادمات الموصوفة من قبل، إلا أنه يسبب ايضاً زيادة إضافية فى عدد التصادمات وانتقال أكبر للزخم فى كل تصادم. إن كلتا هاتين الزيادتين تكونا ناتجة عن تغير درجة الحرارة التى تصاحب الانضغاط الأديباتيكى. تخبرنا النظرية الحركية بأن سرعة جزيئات الغاز تتغير مع الجذر التربيعى لدرجة حرارة الغاز المطلقة ($v \; \alpha \; \sqrt{T}$). حينئذ، فى العملية الأديباتيكية تكون درجة حرارة جزيئات الغاز أكبر منها فى العملية الأيزوثيرمالية، الأمر الذي يجعلها تتحرك بسرعة أكبر، وتتصادم مع جدار الوعاء بشكل أكثر، وأيضا يكون زخم الجزيئات أكبر، مما يجعل الزخم المنقول إلى الجدار فى كل تصادم أكبر منه فى الحالة الأيزوثيرمالية.

بفرض أن التغير فى الحجم هو ΔV ، فإن معدل تغير الزخم (وبالتالى التغير فى الضغط) يبدو أكبر فى العملية الأديباتيكية عنها فى العملية الأيزوثيرمالية. يترتب على ذلك، أنه إذا كان التغير أديباتيكى فإن الغاز يكون أصلب (أى يحتاج إلى قوة أكبر ليتمدد أو لينضغط). سوف نرى لاحقاً أن موجات الصوت تكون عبارة عن تغيرات أديباتيكية فى الأساس.

3-1 انتشار الصوت خلال الغاز Propagation of Sound through Gas

يمكن رصد ووصف انتشار الصوت خلال الغاز بشكل كامل إذا أخذنا فى الاعتبار العوامل التى ناقشناها من قبل، بمعنى كتلة وصلابة الغاز، وتوافقه مع قوانين الفيزياء الأساسية. سوف نقدم هذه المعالجة الرياضية بالتفصيل فى الأبواب اللاحقة. الأن سوف نهتم بالصورة الكيفية لانتشار الصوت.

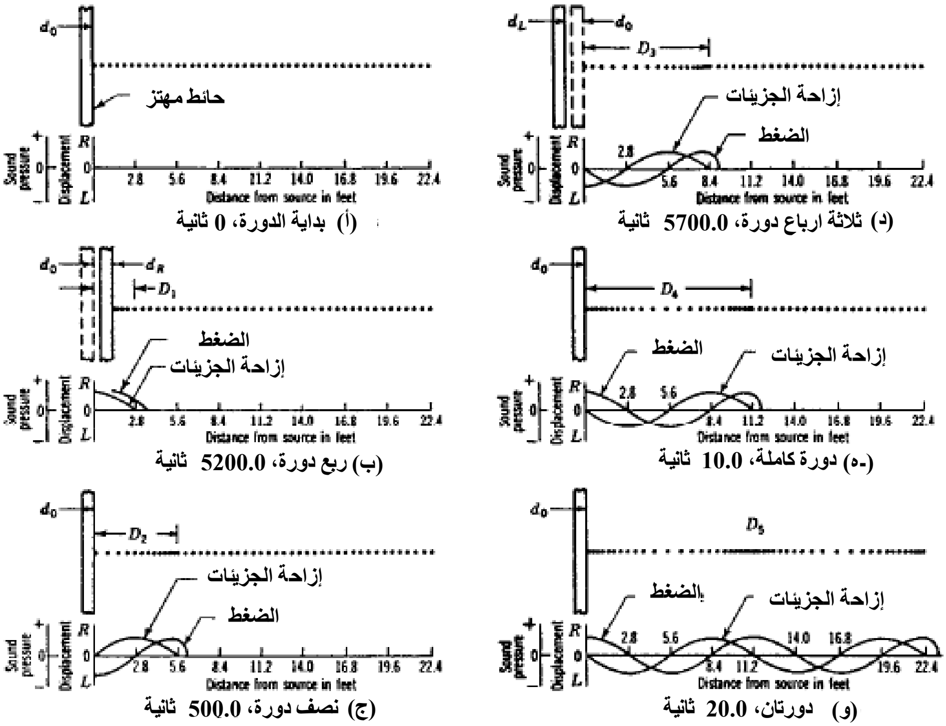
إذا وضعنا فى الغاز جدار يتذبذب بشكل جيبى (الشكل 1-1أ) فإنه سوف يعجل جزيئات الهواء المجاورة ويسبب ضغط على جزء الغاز القريب منه عندما يتحرك من السكون. يظهر هذا الانضغاط المبدئى فى الشكل 1-1ب على هيئة تزاحم للنقط عند مقدمة الجدار. تمثل النقط جزيئات الهواء. بالإضافة إلى السرعات العشوائية لهذه الجزيئات المزدحمة (المتقاربة) للهواء، فإنها تكتسب زخم أمامى (أى فى اتجاه x+) من الجدار. تصطدم هذه الجزيئات مع الجزيئات المجاورة على اليمين وأثناء التصادم ينتقل زخم أمامى إلى هذه الجزيئات، والتى كانت ساكنة فى البداية. تتحرك هذه الجزيئات بدورها مقتربة من الجزيئات المجاورة وتصطدم معها. تستمر هذه العملية وتتقدم بالتدريج أكثر فأكثر وتضع الأجزاء البعيدة من الوسط فى حالة حركة. بهذه الطريقة، من خلال التصادمات المتتابعة ربما تنتقل القوة المبنية بواسطة الانضغاط الأصلى إلى الأجزاء البعيدة من الغاز.

عندما يعكس الجدار حركته، يحدث تخلخل فورى عند مقدمته (الأشكال 1-1 ج و 1-1 د). هذا التخلخل يجعل الجزيئات تعجل إلى الخلف. الأن، تتكرر العملية السابقة فى الاتجاه العكسى، من خلال الدورات المتتالية للمصدر.

لفهم عملية انتشار الصوت يجب تذكر التغيرات النسبية فى الضغط، إزاحة الجزيئات، وسرعة الجزيء. لاحظ أنه عند إى لحظة فإن أقصى إزاحة للجزيء وأقصى ضغط لا يحدث عند نفس النقطة على الموجة. لرؤية ذلك، ارجع إلى الشكل 1-1ج. يحدث أقصى ضغط عندما تكون الجزيئات أكثر تقارب من بعضها البعض، بمعنى، عند $D_2 = 5.6\ \text{ft}$. لكن عند النقطة D_2 نجد أن الجزيئات لم تتحرك بعد من موضع سكونها، كما يمكن رؤية هذا بالمقارنة مع الشكل 1-1أ. حينئذ، عند النقطة D_2 يكون الضغط قيمة عظمى، وتكون إزاحة الجزيئات صفراً. عند هذه اللحظة، فإن الجزيئات التالية للجدار تكون أيضا عند موضع الإزاحة - الصفرية لها، والحائط قد رجع بالكاد إلى موضعه الصفرى.

بالرغم من أن الجزيئات عند كل من D_2 و d_0 لها إزاحة صفرية فإن البيئات المحيطة بها تكون مختلفة قليلا. نجد أن الضغط عند D_2 يكون قيمة عظمى، لكن عند جزيئات الهواء عند d_0 تكون بعيدة جداً ولهذا يكون الضغط عندها قيمة صغرى. عند منتصف المسافة بين d_0 و D_2 نجد أن الضغط يكون عند قيمة الضغط الجوى (ضغط تزايدى صفر)، وتكون إزاحة الجزيئات عند قيمة عظمى. عند النقطة على الموجة التى يكون عندها الضغط قيمة عظمى تكون إزاحة الجزيء صفر.

عندما تكون إزاحة الجزيء قيمة عظمى فإن الضغط التزايدي يكون صفر. وهكذا نجد أن الضغط والإزاحة يكونا خارج الطور بزاوية تساوى 90 درجة (أى أن زاوية فرق الطور بين الضغط والإزاحة تساوى 90 درجة).



الشكل 1-1 : الضغط والإزاحة فى موجة صوتية مستوية متولدة بحائط يتذبذب بشكل جيبى. D_1 يساوى ربع الطول الموجى، D_2 يساوى نصف الطول الموجى، D_3 يساوى ثلاثة أرباع الطول الموجى، D_4 يساوى الطول الموجى، D_5 يساوى ضعف الطول الموجى. R تعنى إزاحة جزيئات الهواء إلى اليمين، و L تعنى إزاحة جزيئات الهواء إلى اليسار، O تعنى عدم وجود إزاحة. النقط المتزاحمة تعنى زيادة موجبة فى الضغط والنقط المنتشرة تعنى زيادة سالبة فى الضغط. تردد التذبذب للموضع هو 100 دورة لكل الثانية

عند أى نقطة ما على الموجة، يتغير ضغط وإزاحة الجزيء بشكل جيبى مع الزمن وبنفس تردد المصدر. إذا تغير الضغط على هيئة $\cos 2\pi ft$ ، فإن إزاحة الجزيء (التى تكون خارج طور الضغط بـ 90 درجة) يجب أن تتغير بالشكل $\sin 2\pi ft$. حينئذ، عند أى نقطة ما على الموجة، تكون سرعة وضغط الجزيء فى طور واحد.

لقد قمنا بتعيين الأطوار النسبية لإزاحة، وسرعة، وضغط الجزيء عند نقطة ما على الموجة. الأن نتساءل، ماهى العلاقة الطوريه التى توجد مثلاً بين قيم إزاحة الجزيء المقاسة عند نقطتين مختلفتين

على الموجة؟ إذا انتقل الفعل المتولد من الحائط بشكل لحظى خلال الوسط فإن كل جزيئات الغاز سوف تتحرك فى طور واحد مع المصدر (الحائط). هذه ليست الحالة، حيث أن سرعة انتشار الصوت تكون محدودة، فإنه عند النقطة المتزايدة البعد عن المصدر يوجد تأخير متزايد لوصول الإشارة. يتحرك كل جزيء فى الوسط إلى الأمام وإلى الخلف بنفس تردد حركة الحائط، لكن ليس فى نفس الوقت. هذا يعنى أن النقطتين اللتين بينهما مسافة محددة على امتداد الموجة بشكل عام لا تتحركان فى نفس الطور بالنسبة لبعضهما البعض. أى نقطتان تتذبذبان فى نفس الطور بالضبط (فى مثال الموجة المستوية هذا) سوف تنفصلان عن بعضهما البعض بمسافة تساوى مضاعف صحيح للطول الموجى. على سبيل المثال، فى الشكل 1-1و فإن النقط 11.2 و 22.4 قدم تنفصل بمسافة تساوى الطول الموجى بالضبط. الاضطراب عند النقطة 22.4 قدم يحدث بعد 0.01 ث تقريباً من حدوثه عند النقطة 11.2 قدم. هذا يقابل سرعة انتشار تساوى 1120 قدم/ث. رياضيا نقول أن الطول الموجى يساوى سرعة الانتشار مقسومة على تردد التذبذب، أى أن،

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad 1\text{-}1$$

حيث λ هو الطول الموجى بالمتر (أو بالقدم)، c سرعة انتشار الموجة الصوتية بالمتر (أو بالقدم) لكل ثانية، و f هو التردد بوحدة دورة لكل ثانية أو بالهيرتز.

الحقيقة الشيقة هى أن موجات الصوت فى الهواء هى موجات طولية، بمعنى أن اتجاه حركة تذبذب جزيئات الهواء تكون فى اتجاه إنتقال الموجة. يمكن رؤية هذا فى الشكل 1-1. على خلاف ذلك، تكون موجات الضوء، الحرارة، أو الراديو فى الفضاء الحر عبارة عن موجات مستعرضة، بمعنى تكون اهتزازات المجالات الكهربية والمغناطيسية عمودية على اتجاه تقدم الموجة. بالمقارنة، الموجات على سطح الماء تكون دائرية. تكون الحركة الاهتزازية لجزيئات الماء فى دائرة (أو شكل بيضوى) صغير، ولكن تسافر الموجة أفقياً.

4-1 سمات الصوت القابلة للقياس Measurable Aspects of Sound

نعتبر أولاً ما هى القياسات الواجب إجرائها على الوسط قبل بدأ موجة الصوت أو الاضطراب فيه. فى المتوسط، تكون جسيمات الغاز (الجزيئات) فى حالة سكون. بالطبع توجد حركة عشوائية للجزيئات، لكن لا توجد محصلة حركة للغاز فى أى اتجاه. وبما أننا نقول أن إزاحة الجسيم هى

الصفر. يترتب على ذلك أن سرعة الجسيم تكون صفراً. أيضاً، عندما لا يوجد اضطراب للوسط، فإن الضغط عند كل النقط يكون ثابتاً ويساوى ضغط البيئة (الوسط المحيط)، لذلك يكون الضغط التزايدي (بمعنى التغير فى الضغط) يكون صفراً. يمكن تعيين ضغط البيئة من قراءة البارومتر (مقياس الضغط). الكثافة هى كمية أخرى يمكن قياسها فى الوسط، وتعرف، كما هو معتاد، بأنها الكتلة مقسومة على الحجم. إنها تساوى كثافة الوسط المحيط عندما لا يوجد اضطراب فى الوسط.

عندما يتنشر الصوت فى وسط يحدث العديد من التغيرات القابلة للقياس. تعجل الجسيمات ويترتب على ذلك إزاحتها عن مواضع سكونها. لا تكون سرعة الجسيم عند أى نقطة مساوية للصفر ماعدا فى بعض اللحظات أثناء التغيير. تتأرجح درجة الحرارة عند أى نقطة أعلى وأسفل درجة حرارة الوسط. كذلك، يتأرجح الضغط عند أى نقطة أعلى وأسفل ضغط الوسط المحيط بها. يسمى هذا التغير المتزايد فى الضغط بضغط الصوت أو الضغط الزائد. يسبب تغير الضغط بدوره تغير فى الكثافة يسمى بالكثافة المتزايدة. إن زيادة ضغط الصوت عند هذه النقطة تؤدى إلى زيادة فى كثافة الوسط عند تلك النقطة.

تختلف السرعة التى ينتشر بها الاضطراب الصوتى خلال الوسط بإختلاف نوع الغاز. وفى حالة غاز معين، تتناسب سرعة الانتشار مع الجذر التربيعى لدرجة الحرارة المطلقة للغاز (المعادلة 1-8). وكما يكون الحال لكل أنواع الحركة الموجية، فإن سرعة الانتشار تعطى بالمعادلة 1-1.

فى الأبواب التالية من هذا الكتاب، سوف نصف آلات وتقنيات قياس معظم الكميات التى تحدثنا عنها من قبل. عندئذ سيبدو الصوت حقيقى، وسوف تشعر بمستوى ضغط – الصوت، بمستوى القدرة، وبالمصطلحات الصوتية الأخرى والتى نحن بصدد تعريفها.

الجزء الثانى - مصطلحات

الآن، تكونت لديك صورة عامة لطبيعة موجة الصوت. وللتعمق أكثر فى علم الصوتيات، يجب عليك تعلم اللغة الخاصة (المصطلحات المقبولة) بهذا العلم. تستخدم العديد من الكلمات الشائعة مثل الضغط، الشدة، والمستوى بأسلوب خاص. في البداية، يجب الإحاطة علماً وبشكل جيد بالمعاني الخاصة لهذه الكلمات. سوف يصبح استخدام هذه الكلمات ثابتة على طول الكتاب. إن قائمة التعاريف المقدمة أدناه لن تنتهي على الإطلاق، وستقدم بعض المصطلحات الإضافية حسب الحاجة في الفصول التالية. إذا كان ممكنناً، يجب أن يكلفك المساعد بعمل قياسات للأصوات باستخدام مقياس مستوى الصوت، محلل الصوت حتى تصبح هذه المصطلحات مرتبطة بشكل حميم بالظواهر الفيزيائية.

فى كل هذا الكتاب سوف يتم استخدام نظام الوحدات م.كجم.ث (mks). بالرغم من أن بعض مهندسى الصوت العمليين ربما يعتقدوا أن هذا الاختيار لا مبرر له نظرا للاستعمال الواسع الانتشار لوحدات النظام سم.جم.ث (cgs)، إلا أنه فى الباب 3 ومرة أخرى فى الباب 10 سوف تظهر البساطة الكبيرة للنتائج بالوحدات م.كجم.ث.

5-1 مصطلحات عامة

(مبدئياً، لوحظ فى النص العربى فى الكثير من الكتب استخدام كلمات "صوتيات" و"سمعيات" وكذلك صفات "صوتى" و "سمعى " كمترادفات وبشكل متكافئ، فيما عدا ما يخص عملية السمع المرتبطة بالأذن البشرية والتى يتم فيها استخدام كلمة "سمعى"، وهذا قد يسبب بعض الإرباك للقارئ، لذلك ومن أجل إزالة الحيرة سوف نكتفي باستخدام الكلمة الأولى "صوتيات، وصوتى" خلال بقية هذا النص، المترجمون.)

<u>**صوتى**</u>

مصطلح الصوتي (Acoustic) **هو** صفة لكلمة صوت، وترتبط بشكل حميم بالموجات الصوتية أو الوسائط الفردية، الظواهر، الأجهزة، الكميات، أو الوحدات التى تم مناقشتها في علم الموجات الصوتية. كما تبين الأمثلة التالية. " جاء خلال الوسط الصوتى إشعاعا سمعيا حاد جدا قادر على توليد صدمة صوتية. للمرشح الصوتى معاوقة خرج صوتية مقدارها 10 - أوم صوتى " الأمثلة الأخرى البوق الصوتى، ناقل الطاقة الصوتى، الطاقة الصوتية، الموجة الصوتية، قابلية الحركة (الحركية) الصوتية، الانكسار الصوتى، الكتلة الصوتية، المكون الصوتى، ثابت الانتشار الصوتى. كما يأتي مصطلح

الصوتى (Acoustical) ايضا كصفة لكلمة صوت، وتعنى المصاحب بشكل عام وأكثر شمولية لعلم الصوت أو للأصناف الأوسع للأوساط، للظواهر، للأجهزة، للكميات، أو الوحدات التى تم مناقشتها في علم الموجات الصوتية. كما تبين الأمثلة التالية. " تظهر الوسائط الصوتية ظواهر صوتية لها كميات صوتية معرفة بشكل جيد ويمكن قياسها بمساعدة أجهزة صوتية، وبدلالة نظام مقبول للوحدات الصوتية.

6-1 الضغط والكثافة Pressure and Density

<u>الضغط الساكن (الإستاتيكى)</u> (P_0)

الضغط الساكن عند نقطة ما فى الوسط هو الضغط الذي سيوجد عند تلك النقطة فى حالة عدم وجود موجات صوتية. عند الضغط الجوى المعتاد، P_0 تساوى بالتقريب 100000 نيوتن/م^2 (10^6 dyne/cm^2). هذا يقابل قراءة على مقياس الضغط (البارومتر) تساوى 0.751 م (29.6 بوصة) زئبق عندما تكون درجة حرارة الزئبق صفر مئوى. عادة يتم اعتبار الضغط الجوى القياسى يساوى 0.760 م زئبق عند الصفر المئوي. هذا الضغط يساوي 1.013×10^5 newtons/m^2. فى هذا الكتاب سيتم استخدام القيمة 10^5 newtons/m^2 فى حل المسائل.

<u>ميكروبار</u> (μb)

الميكروبار هو وحدة لقياس الضغط وتستخدم بشكل شائع فى علم الصوتيات. ميكروبار واحد يساوى 0.1 نيوتن/م^2 أو داين/سم^2. فى هذا الكتاب لا يقتصر استخدم هذه الوحدة على النظام سم.جم.ث.

<u>الضغط اللحظى للصوت</u> $P(t)$

الضغط اللحظى للصوت عند نقطة معينة هو التغير التزايدي من الضغط الساكن عند لحظة معينة الناتج عن وجود الموجة الصوتية. يقاس الضغط اللحظى للصوت بوحدات الميكروبار.

<u>الضغط الفعال للصوت</u> (p)

الضغط الفعال للصوت عند نقطة ما هو جذر متوسط مربع قيمة الضغط اللحظى للصوت على مدى فترة زمنية عند تلك النقطة. يقاس **(p)**. الضغط الفعال للصوت بوحدات الميكروبار. فى حالة ضغوط الصوت الدورية، يجب أن تكون الفترة الزمنية عدد صحيح من الزمن الدورى للموجة. وفى

حالة ضغوط الصوت غير الدورية، يجب أن تكون الفترة الزمنية طويلة بما يكفي لجعل القيمة التى يتم الحصول عليها لا تعتمد على التغيرات الصغيرة فى طول الفترة الزمنية.

كثافة الهواء (ρ_0)

تعطى كثافة هواء البيئة المحيطة بالمعادلات:

$$\rho_0 = 1.29 \frac{273}{T} \frac{P_0}{0.76} \text{ kg/m}^3 \text{ (mks)} \qquad 1\text{-}2$$

$$\rho_0 = 0.00129 \frac{273}{T} \frac{P_0}{0.76} \text{ gm/cm}^3 \text{ (cgs)} \qquad 1\text{-}3$$

حيث T درجة الحرارة المطلقة بالكلفن و P_0 هو الضغط البارومتر بوحدات المتر زئبق. عند درجة حرارة الغرفة $T = 295\ ^oK\ \ (22\ ^oC \text{ or } 71.6\ ^oF)$، وضغط جوى $P_0 = 0.751 \text{ m Hg}$ فإن كثافة الوسط المحيط (البيئة) تكون $\rho_0 = 1.18 \text{ kg/m}^3$. سوف تستخدم هذه القيمة فى حل المسائل ما لم ينص على غير ذلك.

7-1 متجه ومقدار السرعة Speed and Velocity

السرعة (c)

سرعة الصوت فى الهواء تعطى بالتقريب بالمعادلات التالية:

$$c = 331.4 + 0.607\theta \text{ m/sec (mks)} \qquad 1\text{-}4$$

$$c = 33.140 + 60.7\theta \text{ c/sec (cgs)} \qquad 1\text{-}5$$

$$c = 1087 + 1.99\theta \text{ ft/sec (English - centigrade)} \qquad 1\text{-}6$$

$$c = 1052 + 1.106\text{F} \text{ ft/sec (English - Fahrenheit)} \qquad 1\text{-}7$$

حيث θ درجة حرارة الوسط المحيط بالدرجة المئوية، F درجة حرارة الوسط المحيط بالدرجة الفهرنهيت. فى حالة درجة الحرارة الأعلى من $30\ ^oC$ أو الأقل من $-30\ ^oC$ فإن سرعة الصوت يجب أن تحسب بالمعادلة المضبوطة التالية،

$$c = 331.4\sqrt{\frac{T}{273}} = 331.4\sqrt{1+\frac{\theta}{273}} \text{ m/sec} \qquad \text{1-8}$$

حيث T درجة حرارة المطلقة للوسط المحيط بالكلفن. عند درجة حرارة الغرفة $\theta = 22\ ^{o}(F = 71.6\ ^{o})$ تكون $c = 334.8\,\text{m/sec}$ or 1131.2 ft/sec . سوت يتم استخدام هذه القيم فى حل المسائل ما لم ينص على غير ذلك.

سرعة الجسيم اللحظية (سرعة الجسيم) $[u(t)]$

سرعة الجسيم اللحظية عند نقطة ما هى السرعة، نتيجة موجة الصوت فقط، لجزء محدد من الوسط عند لحظة ما. تقاس هذه السرعة عند كل نقطة من الوسط وتحسب للحركة الوسط ككل. تقاس هذه السرعة بوحدات م/ث أو سم/ث.

السرعة الفعالة للجسيم (u)

سرعة الفعالة للجسيم عند نقطة ما هى جذر متوسط مربع السرعة اللحظية للجسيم (للمزيد من التفاصيل أنظر الضغط الفعال للصوت). تقاس هذه السرعة بوحدات م/ث أو سم/ث.

السرعة اللحظية للحجم $[U(t)]$

السرعة اللحظية للحجم، نتيجة موجة الصوت فقط، هى معدل تدفق الحجم فى اتجاه عمودى خلال مساحة معينة S . بمعنى أن $U(t) = S\,u(t)$، حيث $u(t)$ هي السرعة اللحظية للجسيم. تقاس هذه السرعة بوحدات م^3/ث أو سم^3/ث.

8-1 المعاوقة Impedance

المعاوقة الصوتية (المعاوقة الصوتية القياسية الأمريكية).

تعرف المعاوقة الصوتية عند سطح ما بأنها النسبة المركبة بين متوسط ضغط الصوت الفعال (p) محسوب على كل السطح والسرعة الفعالة للحجم خلاله (U). أى أن،

$$Z_A = \frac{p}{U} \text{ newton} - \text{sec/m}^5 \text{ (mks} - \text{acoustic ohms)} \qquad \text{1-9}$$

النسبة المركبة هنا تفيد نفس المعنى للنسبة المركبة بين الجهد والتيار المتردد فى نظرية الدائرة

الكهربية. من الممكن أن يكون السطح عبارة عن سطح افتراضي فى الوسط الصوتي أو السطح المتحرك للجهاز الميكانيكى. تقاس المعاوقة بوحدات نيوتن.ثانية/م^5، أوم صوتى فى النظام م كجم ث (داين.ثانية/سم^5، أوم صوتى فى النظام سم جم ث.)

المعاوقة الصوتية النوعية (Z_s)

المعاوقة الصوتية النوعية هى النسبة المركبة لضغط الصوت الفعال عند نقطة ما فى الوسط الصوتى أو الجهاز الميكانيكي والسرعة الفعالة للجسيم عند نلك النقطة. تقاس هذه الكمية بوحدات نيوتن-ثانية/م^3، أو بوحدات الرايليى فى النظام م كجم ث. (سميت وحدة الرايليى نسبة إلى العالم رايليى.) فى النظام سم جم ث تقاس المعاوقة بوحدات داين-ث/سم^3، أو بالرايليى. أى أن،

$$Z_A = \frac{p}{u} \text{ newton} - \text{sec/m}^3 \text{ (mks} - \text{rayls)} \qquad 1\text{-}10$$

المعاوقة الميكانيكية (Z_M).

المعاوقة الميكانيكية هى النسبة المركبة للقوة الفعالة التى تؤثر على مساحة معينة من الوسط الصوتى أو الجهاز الميكانيكى والسرعة الخطية الفعالة الناتجة خلال أو للمساحة، على وجه الترتيب. تقاس هذه الكمية بوحدات نيوتن-ث/م، أو بوحدات أوم ميكانيكى فى نظام م كجم ث. (فى النظام سم جم ث تكون الوحدة هى داين-ث/سم، أو أوم ميكانيكى.) أى أن،

$$Z_M = \frac{f}{u} \text{ newton} - \text{sec/m (mks} - \text{mechanical ohms)} \quad 1\text{-}11$$

المعاوقة المميزة ($\rho_0 c$)

تعرف المعاوقة المميزة بأنها النسبة بين ضغط الصوت الفعال عند نقطة ما والسرعة الفعالة للجسيم عند تلك النقطة على موجة الصوت المتقدمة المستوية الحرة. المعاوقة المميزة تساوى حاصل ضرب كثافة الوسط فى سرعة الصوت فى هذا الوسط ($\rho_0 c$). هذه المعاوقة تماثل المعاوقة المميزة لخط إرسال ذات طول لا نهائى بدون تبديد. تقاس هذه الكمية بوحدات نيوتن-ث/م، أو بوحدات أوم ميكانيكى فى نظام م كجم ث. (فى النظام سم جم ث تكون الوحدة هى داين-ث/سم، أو أوم ميكانيكى.) فى حل المسائل فى هذا الكتاب سوف نعتبر فى حالة الهواء أن الكمية $\rho_0 c = 407$ mks rayls أو

$(\rho_0 c = 40.7 \text{ rayls})$ تكون صالحة عند درجة حرارة الغرفة والضغط الجوى ($22\ ^\circ\text{C}, 0.751 \text{ mHg}$).

9-1 شدة وكثافة ومستويات الطاقة Intensity, Energy, Density, and Levels

شدة الصوت (I)

شدة الصوت المقاسة فى اتجاه معين عند نقطة ما هى متوسط المعدل الذي تنتشر به الطاقة الصوتية خلال وحدة المساحة العمودية على هذا الاتجاه عند النقطة المعتبرة. تقاس شدة الصوت بوحدات الواط لكل متر مربع. (فى النظام سم جم ث تكون الوحدة إرج لكل ثانية لكل سم^2). فى حالة موجة الصوت الكروية المتقدمة بحرية تعرف الشدة فى اتجاه الانتشار بالمعادلة،

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \quad \text{watts/m}^2 \qquad 1\text{-}12$$

ملاحظة: فى مراجع الصوت يتم التعبير عن شدة الصوت فى العادة بوحدات الواط/سم^2، وهذا يساوى 10^{-7} من الإرج/ث.سم$^{-2}$.

كثافة الطاقة الصوتية (D)

تعرف كثافة الطاقة الصوتية بأنها طاقة الصوت الموجودة عند جزء متناهى الصغر من الغاز مقسومة على حجم هذا الجزء. تقاس هذه الكمية بوحدات الواط- ث/م^3. (فى النظام سم جم ث تكون وحدة القياس إرج/سم^3. فى الكثير من البيئات الصوتية كما فى حالة الموجة المستوية تعطى كثافة الطاقة الصوتية عند نقطة ما بالعلاقة،

$$D = \frac{p^2}{\rho_0 c^2} = \frac{p^2}{\gamma P_0} \qquad 1\text{-}13$$

حيث γ النسبة بين الحرارتين النوعيتين للغاز وتساوى 1.4 قدر كثافة الهواء والغازات الثنائية الذرة الأخرى. الكمية γ بدون أبعاد.

مستوى القدرة الكهربية، أو مستوى الشدة الصوتية.

يعرف مستوى القدرة الكهربية، أو مستوى الشدة الصوتية بأنه الكمية التى تعبر عن النسبة بين

قدرتين كهربيتين أو النسبة بين شدتين صوتيتين فى الشكل اللوغاريتمى، أى أن،

$$\text{Electric Power Level} = 10\log_{10}\frac{W_1}{W_2} \ \text{db} \qquad 1\text{-}14$$

$$\text{Acoustic Intensity Level} = 10\log_{10}\frac{I_1}{I_2} \ \text{db} \qquad 1\text{-}15$$

حيث W_1 و W_2 القدرات الكهربية و I_1 و I_2 الشدات الصوتية.

بتوسيع هذا المفهوم إلى مدى أوسع يمكن أن نرى من المعادل 1-14 أن

$$\begin{aligned}\text{Electric Power Level} &= 10\log_{10}\frac{E_1^{\,2}}{R_1}\frac{R_2}{E_2^{\,2}} \\ &= 20\log_{10}\frac{E_1^{\,2}}{E_2^{\,2}} + 10\log_{10}\frac{R_2}{R_1} \quad \text{db}\end{aligned} \qquad 1\text{-}16$$

حيث E_1 هو الجهد عبر طرفى المقاومة R_1 والتى تتبدد فيها الطاقة W_1، و E_2 هو الجهد عبر طرفى المقاومة R_2 والتى تتبدد فيها الطاقة W_2. وبالمثل نحصل على،

$$\text{Acoustic Intensity Level} = 20\log_{10}\frac{p_1}{p_2} + 10\log_{10}\frac{R_{s2}}{R_{s1}} \quad \text{db} \qquad 1\text{-}17$$

حيث p_1 الضغط عند النقطة التى تكون عندها المقاومة الصوتية النوعية (بمعنى الجزء الحقيقى من المعاوقة النوعية للصوت) R_{s1} و p_2 الضغط عند النقطة التى تكون عندها المقاومة الصوتية النوعية (بمعنى الجزء الحقيقى من المعاوقة النوعية للصوت) R_{s2}. نلاحظ أن $10\log_{10}\left(\frac{W_1}{W_2}\right)$ $= 20\log_{10}\left(\frac{E_1}{E_2}\right)$ فقط عندما $R_1 = R_2$ و أن $10\log_{10}\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$ فقط عندما $R_{s2} = R_{s1}$.

أحيانا، يتم الحديث عن المستويات التى تشتمل على جهد وضغط فقط دون النظر إلى معادلات المقاومات الكهربية أو المقاومات النوعية للصوت. تؤدى هذه الممارسة إلى إرباك خطير. يجب التأكيد دائما على ذكر الأسلوب الذي تستعمل فيه الكميات بشكل واضح من قبل المستعمل لتفادى

الالتباس.

مستوى ضغط الصوت (SPL)

يعرف مستوى ضغط الصوت (بوحدات الديسيبل) بأنه 20 مرة قدر اللوغاريتم للأساس 10 للنسبة بين ضغط الصوت الفعال المقاس لهذا الصوت والضغط الفعال المرجعى للصوت. أى أن،

$$\text{SPL} = 20 \log_{10} \frac{p}{p_{\text{ref}}} \quad \text{db} \qquad 1\text{-}18$$

فى الولايات المتحدة الأمريكية يكون p_{ref} إما

(أ) $p_{\text{ref}} = 0.0002 \text{ microbar } (2 \times 10^{-5} \text{ newton/m}^2)$ أو

(ب) $p_{\text{ref}} = 1 \text{ microbar } (0.1 \text{ newton/m}^2)$

بشكل عام، يستخدم الضغط المرجعى (أ) فى القياسات المتعلقة بالسمع ومستوي الصوت وقياسات الضوضاء فى الهواء والسوائل. يستخدم الضغط المرجعى (ب) بشكل واسع الانتشار فى معايرات محولات الطاقة وبعض أنواع قياسات مستوي الصوت فى السوائل. أن كلا الضغطين المرجعيين (أ) و (ب) دائما يساويان 74 ديسيبل بالضبط. يجب النص على الضغط المرجعى بوضوح.

مستوى الشدة (IL)

يعرف مستوى شدة الصوت (بوحدات الديسيبل) بانه 10 مرات قدر اللوغاريتم للأساس 10 للنسبة بين شدة هذا الصوت والشدة المرجعية. أى أن،

$$\text{IL} = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{\text{ref}}} \qquad 1\text{-}19$$

فى الولايات المتحدة الأمريكية تكون الشدة المرجعية عادة $10^{-16} \text{ watt/cm}^2$ أو $10^{-12} \text{ watt/m}^2$. تم إختيار هذا المرجع فى الأساس (عند الظروف القياسية للجو فى للموجة المستوية أو الكروية) كمقابل تقريبى للضغط المرجعى (0.0002 ميكروبار).

يمكن الحصول على العلاقة المضبوطة بين مستوى شدة الصوت ومستوى ضغط الصوت للموجة المستوية أو الكروية المتقدمة بالتعويض بالمعادلة 1-12 فى المعادلة 1-19.

$$\text{IL} = \text{SPL} + 10\log_{10}\frac{p_{\text{ref}}^{2}}{\rho_0\, c\, I_{\text{ref}}} \quad \text{db} \qquad 1\text{-}20$$

بالتعويض بـ $p_{\text{ref}} = 2\times10^{-5}$ newton/m^2 و $I_{\text{ref}} = 10^{-12}$ watt/m^2 فى المعادلة السابقة نحصل على،

$$\text{IL} = \text{SPL} + 10\log_{10}\frac{400}{\rho_0\, c} \quad \text{db} \qquad 1\text{-}21$$

من الواضح أن مستوى الشدة IL سوف يساوى مستوى ضغط الصوت فقط عندما $\rho_0 c = 400$ mks rayls . يكون هذا حقيقى فى بعض مجموعات درجة الحرارة والضغط الساكن، بالرغم من أن $\rho_0 c = 407$ mks rayls عندما $T = 22^{\circ}\text{C}$ و $P_0 = 0.751$ m Hg . فى هذه الحالة الشائعة، يكون مستوى الشدة أقل من مستوى ضغط الصوت بمقدار 0.1 ديسيبل. بغض النظر عن الكمية المرجعية المستخدمة، يجب دائماً النص على المرجع المستخدم بوضوح.

مستوى القدرة الصوتية (PWL)

مستوى القدرة الصوتية (بوحدات الديسيبل هو 10 مرات قدر اللوغاريتم للأساس 10 للنسبة بين القدرة الصوتية المنبعثة من المصدر والقدرة الصوتية المرجعية. أى أن،

$$\text{PWL} = 10\log_{10}\frac{W}{W_{\text{ref}}} \quad \text{db} \qquad 1\text{-}22$$

فى هذا الكتاب تم اعتبار أن القدرة المرجعية W_{ref} تساوى 10^{-13} watt. هذا يعنى أن المصدر الذي يشع واط واحد صوتى له مستوى قدرة 130 ديسيبل.

عند درجة الحرارة $22^{\circ}\text{C}\,(67^{\circ}\text{F})$ و ضغط 1.013×10^{5} newton/m^2 أو $(0.76\ \text{m Hg})$ ، فإن مستوى ضغط الصوت فى القناة ذات مساحة المقطع 1 قدم مربع، أو عند مسافة 0.282 قدم من مركز المصدر "النقطى" (عند هذه المسافة فإن مساحة السطح الكروى يكون 1 قدم مربع)، من المعادلة 1-12 و المعادلة 1-18 يكون على الصورة،

$$SPL_{1\,\text{ft}^2} = 10\log_{10}\frac{I\rho_0 c}{p_{\text{ref}}^{\;2}} = 0\log_{10}\frac{W\rho_0 c}{Sp_{\text{ref}}^{\;2}}$$
$$= 10\log_{10}\left[\frac{W}{0.093}\times 412.5\times\frac{1}{(2\times10^{-5})^2}\right]$$
$$= 10\log_{10}\frac{W}{10^{-13}} + 0.5$$

حيث W القدرة الصوتية بالواط، $\rho_0 c$ المعاوقة المميزة وتساوى 412.5 mks rayls، S تساوى1 قدم² أى 0.093 م²، و p_{ref} ضغط الصوت المرجعى ويساوى 2×10^{-4} newton/m^2 .

فى كلمات بسيطة، مستوى ضغط الصوت يساوى مستوى القدرة الصوتية زائد 0.5 ديسيبل عند الظروف الخاصة بأن تمر القدرة بشكل متجانس خلال المساحة 1 قدم²، ودرجة حرارة 20^oC و ضغط جوى 0.76 متر (30 بوصة) زئبق.

مستوى الصوت

مستوى الصوت عند نقطة فى مجال الصوت هو القراءة بالديسيبل لمقياس مستوى صوت مجهز ويعمل طبقاً لمعايير مقاييس الصوت القياسية الأمريكية لقياس الضوضاء والأصوات الأخرى.

تقابل قراءة المقياس (بالديسيبل) قيمة تكامل ضغط الصوت على مدى التردد المسموع مع تردد معين للوزن وزمن التكامل.

مستوى نطاق القدرة (PWL_n)

مستوى نطاق القدرة لنطاق تردد معين هو مستوى القدرة الصوتية للقدرة الصوتية المحتواه خلال النطاق. يجب تحديد عرض النطاق والقدرة المرجعية. يقاس هذا التعبير بوحدات الديسيبل. المدلول الحرفى n هو عدد للتمييز للنطاق المأخوذ فى الاعتبار.

مستوى ضغط النطاق (BPL_n)

مستوى ضغط النطاق للصوت فى نطاق ذات تردد محدد هو مستوى ضغط الصوت الفعال للطاقة الصوتية المحتواه خلال النطاق. يجب تحديد عرض النطاق والضغط المرجعي. تقاس هذه الكمية بوحدات الديسيبل. المدلول الحرفى n هو عدد للتمييز للنطاق المأخوذ فى الاعتبار.

مستوى طيف القدرة

مستوى طيف القدرة للصوت عند تردد معين هو مستوى القدرة الفعالة للقدرة الصوتية فى نطاق ذى عرض يساوى دورة واحدة فى الثانية، ومتمركز عند التردد المعين. يجب تحديد القدرة المرجعية. تقاس هذه الكمية بوحدات الديسيبل (ارجع أيضاً إلى مناقشة مستوى طيف الضغط).

مستوى طيف الضغط

مستوى طيف الضغط للصوت عند تردد معين هو مستوى الضغط الفعال للطاقة الصوتية المحتواه فى نطاق ذى عرض يساوى دورة واحدة فى الثانية، ومتمركز عند التردد المعين. يجب تحديد الضغط المرجعي بوضوح. تقاس هذه الكمية بوحدات الديسيبل.

مناقشة. إن لمفهوم مستوى طيف الضغط معنى فقط للصوت الذي يملك انتشار متصل للطاقة خلال مدى من الترددات قيد الاعتبار. يزيد مستوى النطاق الموحد للضوضاء ذات الطيف المتصل عن مستوى الطيف بمقدار،

$$C_n = 10\log_{10}(f_b - f_a)\ \text{db} \qquad 1\text{-}23$$

حيث f_b و f_a التردد العلوى والتردد السفلى للنطاق، على وجه الترتيب. لهذا، يرتبط مستوى الضوضاء الموحدة ذات الطيف المتصل فى نطاق له عرض cps $f_b - f_a$ بمستوى الطيف بالمعادلة،

$$L_n = C_n + S_n \qquad 1\text{-}24$$

حيث L_n هو مستوى ضغط الصوت بالديسيبل للضوضاء فى نطاق ذى عرض $f_b - f_a$ ، بالنسبة C_n ارجع للمعادلة 1-23، S_n هو مستوى الطيف للضوضاء، و n هو مدلول تمييزى للنطاق قيد الاعتبار.

الباب الثانى

معادلة الموجة وحلولها

THE WAVE EQUATION AND SOLUTIONS

الجزء الثالث - معادلة الموجة

1-2 مقدمة Introduction

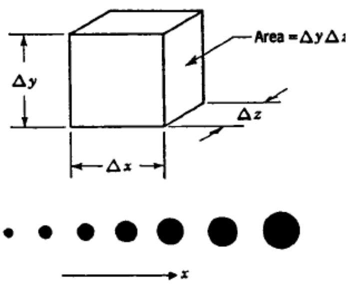
لقد لخصنا بطريقة كمية، طبيعة انتشار الصوت في الغاز. في هذا الباب سوف نضع المبادئ الفيزيائية التى تم وصفها سابقاً فى الشكل الرياضى. تتكون المعالجة من خطوتين. الأولى، سوف نؤسس المعادلات التى تعبر عن القانون الثانى للحركة لنيوتن، قانون الغازات، وقوانين بقاء (حفظ) الكتلة. الخطوة الثانية، سوف ندمج هذه المعادلات لاستنتاج معادلة الموجة.

تم تقديم الاشتقاق ات الرياضية بطريقتين: باستخدام وبدون استخدام جبر المتجهات. سيقدر من يألف الترميز المتجهي تعميم المعالجة بالمتجهات الثلاثية الأبعاد. تم إنجاز النوعين من الاشتقاق ات بشكل متوازى، حيث فيما يلى يتم استنتاج معادلة الموجة فى بعد واحد على يمين الصفحة باستخدام الترميز التفاضلى البسيط، وعلى يسار الصفحة تم اشتقاق معادلة الموجة فى الأبعاد الثلاثة باستخدام الترميز المتجهي. تتبين بساطة العمليات المتجهيه (جنبا إلى جنب) فى الاشتقاق ين.

2-2 اشتقاق معادلة الموجة Derivation of the Wave Equation

معادلة الحركة

عند كتابة القانون الثانى لنيوتن لحجم صغير من الغاز موضوع فى وسط متجانس نحصل على معادلة الحركة، أو معادلة القوة كما تسمى أحياناً. تخيل حجم صغير من غاز محصور فى صندوق له أوجه مرنة لا وزن لها، الشكل 2-1



الشكل 2-1 يمثل الصندوق الصغير جداً من الهواء المبين هنا جزء من وسط غازى يزداد فيه ضغط الصوت من اليسار إلى اليمين عند معدل فضاء $\partial p/\partial x$ (أو فى ترميز المتجهات تدرج الضغط $\text{grad } p$). يدل حجم النقاط على مقدار ضغط الصوت عند كل نقطة.

الاشتقاق فى بعد واحد[1]

دعنا نفترض أن الصندوق يقع في وسط يزداد ضغط الصوت فيه من اليسار إلى اليمين بمعدل فضائى يساوى $\partial p/\partial x$، كما هو مبين فى الشكل 2-1.

الاشتقاق فى الأبعاد الثلاثة[2]

دعنا نفترض أن الصندوق يقع في وسط (الشكل 2-1) حيث يتغير ضغط الصوت بمعدل فضائى يساوى

$$\text{grad } p = \boldsymbol{i}\frac{\partial p}{\partial x} + \boldsymbol{j}\frac{\partial p}{\partial y} + \boldsymbol{k}\frac{\partial p}{\partial z}$$

حيث $\boldsymbol{i}$، $\boldsymbol{j}$ و $\boldsymbol{k}$ متجهات الوحدة فى الاتجاه ات x ، y، و z، على وجه الترتيب، و p هو الضغط عند النقطة.

إقترض أن جوانب الصندوق تكون عديمة الاحتكاك تماماً، بمعنى أن، أى مقاومة مرنة بين جزيئات الغاز داخل الصندوق وتلك التى توجد خارج الصندوق تكون مهملة. بالتالى، تكون القوى الوحيدة التى تؤثر على الغاز المحصور ناتجة عن الضغوط عند أوجه الصندوق.

(بعد واحد)

القوة التى تعمل على تعجيل الصندوق فى الاتجاه الموجب لـ x تساوى

$$f = -\left(\frac{\partial p}{\partial x}\Delta x\right)\Delta y\,\Delta z \quad \text{2-1 (أ)}$$

(الأبعاد الثلاثة)

القوة التى تعمل على تعجيل الصندوق فى الاتجاه الموجب لـ x تساوى

$$f=-\begin{bmatrix} \boldsymbol{i}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\Delta x\right)\Delta y\,\Delta z+ \\ \boldsymbol{j}\left(\frac{\partial p}{\partial y}\Delta y\right)\Delta x\,\Delta z+ \\ \boldsymbol{k}\left(\frac{\partial p}{\partial z}\Delta z\right)\Delta x\,\Delta y \end{bmatrix} \quad \text{2-1 (ب)}$$

لاحظ أن الميل الموجب يسبب تعجيل للصندوق فى الاتجاه السالب لمحور x.

بقسمة طرفى المعادلة السابقة على $V=\Delta x\Delta y\Delta z$ نحصل على القوة لوحدة الحجم التى تعمل على تعجيل الصندوق على الصورة

$$\frac{f}{V}=-\frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{2-2(أ)}$$

بقسمة طرفى المعادلة السابقة على $V=\Delta x\Delta y\Delta z$ نحصل على القوة لوحدة الحجم التى تعمل على تعجيل الصندوق على الصورة

$$\frac{f}{V}=-\text{grad }p \quad \text{2-2(ب)}$$

من قانون نيوتن، القوة لوحدة الحجم (f/V) فى المعادلة 2-2يجب أن تساوى المعدل الزمنة لتغير الزخم لوحدة الحجوم من الصندوق. لقد افترصنا أن الصندوق شكل قابل للتشوه لذلك تكون كتلة الغاز المحصور فيه ثابت دائماً، أى أن

$$\frac{f}{V}=-\frac{\partial p}{\partial x}=\frac{M}{V}\frac{\partial u}{\partial t}=\rho'\frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{2-3(أ)}$$

حيث u السرعة المتوسطة للغاز فى الصندوق فى الاتجاه x، ρ' هو متوسط الكثافة اللحظية الفضائية للغاز فى الصندوق، و $M=\rho'V$ هو الكتلة الكلية للغاز فى الصندوق.

$$\frac{f}{V}=-\text{grad }p=\frac{M}{V}\frac{Dq}{Dt}=\rho'\frac{Dq}{Dt} \quad \text{2-3(ب)}$$

حيث q متجه السرعة المتوسطة للغاز فى الصندوق، ρ' هو متوسط الكثافة اللحظية الفضائية للغاز فى الصندوق ، و D/Dt ليست المشتقة الجزئية البسيطة ولكن تمثل المعدل الكلى للتغير فى سرعة جزء خاص من الغاز فى الصندوق بغض النظر عن موضعه، بمعنى أن،

$$\frac{Dq}{Dt}=\frac{\partial q}{\partial t}+q_x\frac{\partial q}{\partial x}+q_y\frac{\partial q}{\partial y}+q_z\frac{\partial q}{\partial z}$$

إذا كان التغير فى كثافة الغاز نتيجة موجة الصوت صغيراً بشكل كافى، حينئذ يمكن تقريب الكثافة اللحظية ρ' لتساوى الكثافة المتوسطة ρ_0، حينئذ يمكن كتابة

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{2-4(أ)}$$

حيث q_x، q_y، و q_z هى مركبات متجة سرعة الجسيم.

إذا كان متجه سرعة الجسيم $\boldsymbol{q}$ صغيراً بالشكل الكافى فإن معدل التغير فى زخم الجسيم فى الصندوق يمكن تقريبه ليساوى معدل تغير الزخم عند نقطة ثابتة، $Dq/Dt = \partial q/\partial t$، حينئذ يمكن تقريب الكثافة اللحظية ρ' لتساوى الكثافة المتوسطة ρ_0، حينئذ يمكن كتابة

$$-\text{grad}\ p = \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{2-4(ب)}$$

التقريبات التى قمنا بها مقبولة بشكل عام بشرط أن تكون مستويات ضغط الصوت قيد الاعتبار اقل من 110 ديسيبل أو 0.0002 ميكروبار. تكون المستويات الأعلى من 110 ديسبيل كبيرة لدرجة أنها تولد سمع غير مريح عند كثير من الناس، كما سنرى فى الباب 13 فى نهاية هذا الكتاب.

<u>قانون الغاز</u>

بفرض غاز مثالى، يمكن تطبيق قانون شارلز – بويل على الصندوق، أى أن،

$$PV = RT \quad \text{2-5}$$

حيث P الضغط الكلى فى الصندوق، V الحجم ويساوى $\Delta x \Delta y \Delta z$، و T درجة الحرارة المطلقة بالكلفن، و R ثابت الغاز تعتمد قيمته على كتلة الغاز المختار. (إذا تم اختيار كتلة الغاز بحيث تكون كتلته بالجرامات مساوية للوزن الجزيئى (مول واحد) حينئذ يكون الحجم عند 0^{o}C و $0.76\,\text{m Hg}$ يكون واحداً للكل الغازات ويساوى $0.02242\,\text{m}^3$. حينئذ $R = 8.314\ \text{watt}-\text{sec}/^{o}\text{C/gram}-\text{molecular weight}$. إذا تم اختيار كتلة الغاز لتكون قدر الوزن

الجزيئى بـ n من المرات فإن $R = 8.314n$.) لكن، قبل إنشاء هذه العلاقة يجب أن نعرف كيف تتغير درجة الحرارة T مع تغير الضغط P والحجم V، وعلى وجه الخصوص إذا ما كانت الظاهرة أديباتيكية أو أيزوثيرمية.

عند الترددات المسموعة يكون الطول الموجى للصوت طويلاً مقارنة بالمسافات الفاصلة بين جزيئات الهواء. على سبيل المثال، عند تردد 100 هيرتز يكون الطول الموجى (λ) هو 0.34 متر، بينما المسافة الفاصلة بين الجزيئات تكون 10^{-9} m. الأن، عند ضغط أى جزء من الغاز بسرعة، فإن درجة حرارته ترتفع، وعلى العكس، عند تمدده بشكل مفاجئ فإن درجة الحرارة تنخفض. لهذا، فإن درجة الحرارة عند أى نقطة فى مجال الصوت المتردد ترتفع وتنخفض مقارنة مع درجة حرارة البيئة المحيطة. تحدث هذه التغيرات عند نفس التردد مثل تردد مصدر الموجة الصوتية وتكون فى طور واحد مع ضغط الصوت.

دعنا نفترض، للحظة، أن موجة الصوت لها تردد واحد فقط. عند النقط التى تنفصل بمسافات تساوى نصف الطول الموجى، تكون تأرجحات الضغط ودرجة الحرارة خارج الطور بـ 180 درجة عن بعضهما البعض. الأن يظهر التساؤل، هل يوجد هناك زمن كافى خلال نصف درجة الحرارة لحدوث تبادل حراري بين هاتين النقطتين التى لهما فرق درجة حرارة قيمة عظمى (أى اللتان بينهما أكبر فرق فى درجة الحرارة)؟

لقد ثبت [3] أنه عند الظروف الجوية العادية فإن سرعة انتقال موجة الانتشار الحراري عند 1000 هيرتز تكون 0.5 م/ث تقريباً وعند 10 كيلو هيرتز تكون 1.5 م/ث تقريباً. يكون زمن نصف دورة للتردد 1000 هيرتز هو 0.0005 ثانية. فى هذا الزمن، تسافر الموجة الحرارية مسافة قدرها 0.00025 متر فقط. يكون هذا الرقم صغيراً جداً مقارنة مع نصف الطول الموجى (0.17 متر) عند 1000 هيرتز. عند 10 كيلوهيرتز تسافر الحرارة مسافة 7.5×10^{-5} m وهى مسافة صغيرة أيضاً مقارنة مع نصف الطول الموجى (1.7×10^{-2} m). لهذا، يظهر بشكل آمن أنه يمكننا استنتاج أنه يوجد تبادل حراري صغير ومهمل فى الموجه عند مدى التردد المسموع. يقال للإنضغاط والتمدد الغاز من هذا النوع بأنه أديباتيكى.

بالنسبة للتمددات الأديباتيكية، تكون العلاقة بين الضغط الكلى والحجم على الصورة[4]،

$$PV^{\gamma} = \text{constant} \qquad 2\text{-}6$$

حيث γ النسبة بين الحرارة النوعية للغاز عند ضغط ثابت والحرارة النوعية للغاز عند حجم ثابت. تم الحصول على هذه المعادلة من قانون الغاز فى شكل المعادلة 2-5، بفرض ظروف أديباتيكية. بالنسبة للهواء، الهيدروجين، النيتروجين، والأكسيجين، أى للغازات ذات الجزيئات الثنائية الذرة تكون $\gamma = 1.4$.

بكتابة المعادلة 2-6 فى الشكل التفاضلى، نحصل على،

$$\frac{dP}{P} = -\frac{\gamma\, dV}{V} \qquad \text{2-7}$$

بفرض أن

$$P = P_0 + p \quad \& \quad V = V_0 + \tau \qquad \text{2-8}$$

حيث P_0 و V_0 هما الضغط والحجم غير المضطربين على الترتيب، و p و τ هما الضغط والحجم المتزايدين بسبب وجود موجة الصوت، على الترتيب. حينئذ ، بعمل نفس التقريب الذي فعلناه من قبل فى المعادلة 2-4، وبسبب أن $p << P_0$ و $\tau << V_0$ نحصل على،

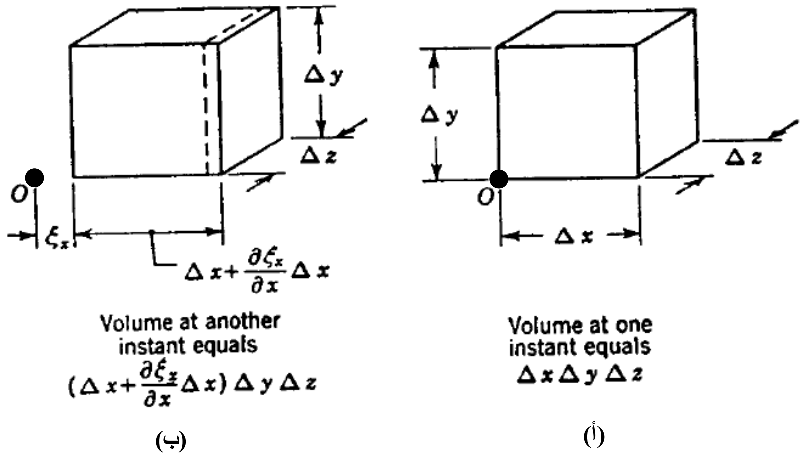
$$\frac{p}{P_0} = -\frac{\gamma\, \tau}{V_0} \qquad \text{2-9}$$

بتفاضل هذه المعادلة بالنسبة للزمن نحصل على،

$$\frac{1}{P_0}\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\gamma}{V_0}\frac{\partial \tau}{\partial t} \qquad \text{2-10}$$

<u>معادلة الاتصال (الاستمرارية).</u>

معادلة الاتصال هى تعبير رياضى ينص على أن الكتلة الكلية للغاز فى الصندوق القابل للتشوه يجب أن تبقى ثابتة. بسبب هذا القانون لحفظ الكتلة، نستطيع كتابة علاقة فريدة بين المعدل الزمنى لتغير السرعات التزايدية عند سطح الصندوق. فى الاشتقاق التالى نشير إلى الشكل 2-2.



الشكل 2-2: تغير حجم الصندوق مع تغير الموضع. من الأشكال (أ) و (ب) يتبين أن التغير التزايدي فى حجم الصندوق يساوى $\tau = (\partial \xi_x / \partial x)\Delta x \Delta y \Delta z$.

الاشتقاق فى بعد واحد	الاشتقاق فى الأبعاد الثلاثة
بالإشارة إلى الشكل 2-2. عند بقاء كتلة الغاز فى الصندوق ثابتة، فإن التغير فى الحجم τ يعتمد فقط على الفرق فى إزاحة جسيمات الهواء على جانبى الصندوق. الطريقة لقول هذا هى أنه مالم تتحرك جزيئات الهواء المجاورة لأي جانب للصندوق المتحرك بنفس سرعة الصندوق نفسه، فإن البعض سيعبر إلى أو خارج الصندوق وستتغير كتلة الهواء داخل الصندوق. فى فترة زمنية معينة، سوف تزاح الجسيمات عند الجانب الأيسر للصندوق مسافة ξ_x . فى نفس هذا الوقت، سوف تنزاح الجسيمات الموجودة عند الجانب الأيمن من الصندوق مسافة $\xi_x + \frac{\partial \xi_x}{\partial x}\Delta x$. بضرب الفرق بين الكميتين فى المساحة $\Delta y \Delta z$ نحصل على الزيادة فى الحجم τ	عند بقاء كتلة الغاز فى الصندوق ثابتة، فإن التغير فى الحجم τ يعتمد فقط على الفرق فى إزاحة جسيمات الهواء على جانبى الصندوق. الطريقة لقول هذا هى أنه مالم تتحرك جزيئات الهواء المجاورة لأي جانب للصندوق المتحرك بنفس سرعة الصندوق نفسه، فإن البعض سيعبر إلى أو خارج الصندوق وستتغير كتلة الهواء داخل الصندوق. لهذا فإن

.

$$\tau = \frac{\partial \xi_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad 2\text{-}11(\text{أ})$$

أو

$$\tau = V_0 \frac{\partial \xi_x}{\partial x} \quad 2\text{-}12$$

بالتفاضل بالنسبة للزمن نحصل على،

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = V_0 \frac{\partial u}{\partial x} \quad 2\text{-}13(\text{أ})$$

حيث u السرعة اللحظية للجسيم.

$$\tau = V_0 \ \operatorname{div} \xi \quad 2\text{-}11(\text{ب})$$

بالتفاضل بالنسبة للزمن نحصل على،

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = V_0 \ div\, q \quad 2\text{-}13(\text{ب})$$

حيث q السرعة اللحظية للجسيم.

معادلة الموجة في الإحداثيات المتعامدة

الاشتقاق فى بعد واحد

يتم الحصول على معادلة الموجة فى بعد واحد بدمج معادلة الحركة (2-4أ)، وقانون الغاز (2-10) ومعادلة الاتصال (2-13أ). من المعادلتين 2-10 و 2-13أ

نحصل على،

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\gamma P_0 \frac{\partial u}{\partial x} \quad 2\text{-}14(\text{أ})$$

بالتفاضل بالنسبة للزمن نحصل على،

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\gamma P_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \quad 2\text{-}15(\text{أ})$$

بتفاضل المعادلة 2-4أ بالنسبة لـ x،

$$-\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \quad 2\text{-}16(\text{أ})$$

الاشتقاق فى الأبعاد الثلاثة

يتم الحصول على معادلة الموجة فى بعد واحد بدمج معادلة الحركة (2-4ب)، وقانون الغاز (2-10) ومعادلة الاتصال (2-13ب). من المعادلتين 2-10 و 2-13ب نحصل على،

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\gamma P_0 \ div\, q \quad 2\text{-}14(\text{ب})$$

بالتفاضل بالنسبة للزمن نحصل على

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\gamma P_0 \ div \frac{\partial q}{\partial t} \quad 2\text{-}15(\text{ب})$$

بتطبيق قانون الانتشار على طرفى المعادلة 2-4ب نحصا على

$$-\operatorname{div}(\operatorname{grad} p) = \rho_0 \operatorname{div} \frac{\partial q}{\partial t} \quad 2\text{-}16(\text{ب})$$

بإستبدال $\nabla^2 p$ مكان $\operatorname{div}(\operatorname{grad} p)$،

$$-\nabla^2 p = \rho_0 \, div \frac{\partial q}{\partial t} \quad 2\text{-}17$$

حيث ∇^2 مؤثر يسمى لابلاس.

بفرض إمكانية التبديل بين x و t ودمج 2-15أ و 2-16أ نحصل على،

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\rho_0}{\gamma P_0} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad 2\text{-}18(\text{أ})$$

بدمج المعادلتين 2-15ب و 2-17 نحصل على،

$$\nabla^2 p = \frac{\rho_o}{\gamma P_o} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad 2\text{-}18(\text{ب})$$

دعنا من التعريف نضع،

$$c^2 \equiv \frac{\gamma P_0}{\rho_0} \qquad 2\text{-}19$$

سنرى لاحقاً أن c هى سرعة انتشار الموجة الصوتية فى الوسط.

نحصل على معادلة الموجة فى بعد واحد على الصورة،

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad 2\text{-}21(\text{أ})$$

نحصل على معادلة الموجة فى الأبعاد الثلاثة على الصورة،

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad 2\text{-}21(\text{ب})$$

فى الإحداثيات المتعامدة نحصل على

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad 2\text{-}21$$

من الممكن أيضاً التخلص من p والإبقاء على u وفى هذه الحالة يكون لدينا،

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad 2\text{-}22(\text{أ})$$

من الممكن أيضاً التخلص من p والإبقاء على q وفى هذه الحالة يكون لدينا،

$$\nabla^2 q = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} \quad 2\text{-}22(\text{ب})$$

حيث $\nabla^2 q = \text{grad}\,(\text{div}\,\text{q})$ عندما لا يوجد دوران فى الوسط.

يتم تطبيق المعادلات 2-20 و 2-22 على الموجات الصوتية ذات السعة الصغيرة التى تنتشر فى فى الغاز المتجانس، الموحد الخصائص فى جميع الاتجاه ات، والذي لا يحتوى على مصدر وأن يكون الغاز عديم الاحتكاك، وفى حالة سكون.

معادلة الموجة فى المحاور الكروية.

كانت معادلة الموجة فى بعد واحد (التى تم اشتقاقها سابقا) عبارة عن معادلة انتشار موجة مستوية على طول بعد واحد فى نظام محاور متعامدة. فى الغرفة المعدومة الصدى (anechoic chamber) أو فى الفضاء الحر، كثيراً ما نرغب فى التعبير رياضياً عن الإشعاع الصوتى من مصدر صوتى كروي (غير موجهه). فى هذه الحالة، سوف تتسع الموجة الصوتية كلما ابتعدت عن المصدر، كما سوف يكون صدر الموجة سطح كروي دائماً. ولكي نطبق معادلة الموجة على الموجات الكروية، يجب أن نستبدل المؤثرات الموجودة فى الطرف الأيسر من المعادلات 2-20 و 2-22 بمؤثرات تتلاءم مع المحاور الكروية.

بفرض أن الإشعاع متساوى فى جميع الاتجاه ات، فإن معادلة الموجة فى اتجاه واحد فى المحاور الكروية تكون،

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \qquad 2\text{-}23$$

التفاضل البسيط يبين أن المعادلة 2-23 يمكن أن تكتب أيضاً على الصورة،

$$\frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 (pr)}{\partial t^2} \qquad 2\text{-}24$$

من الشيق أن نلاحظ أن هذه المعادلة لها نفس الشكل مثل المعادلة 2-20أ. لذلك، سوف يتم تطبيق نفس الحل الشكلى على أى معادلة منهما ما عدا أن المتغير التابع يكون $p(x,t)$ فى إحدى الحالات و $pr(r,t)$ فى الحالة الثانية.

المثال 2-1

فى الحالة المستقرة، بمعنى أن $\partial u / \partial t = j\,\omega u$ ، عين رياضياً كيف يمكن تعيين ضغط الصوت فى الموجة الصوتية المستوية المتقدمة (فى بعد واحد) وذلك من قياس سرعة الجسيم فقط.

الحل

من المعادلة 2-4أ نجد أنه فى الحالة المستقرة أن

$$\frac{-\partial p}{\partial x} = j\,\omega\,\rho_0\,u$$

حيث p و u قيم ج م م (جذر متوسط مربعات) ضغط الصوت وسرعة الجسيم، على وجه الترتيب. بكتابة المعادلة فى الشكل التفاضلى،

$$-\Delta p = j\,\omega\,\rho_0\,u\,\Delta x.$$

عندما تكون سرعة الجسيم 1 سم/ث، و $\omega = 1000\,\text{radians/sec}$ ، و $\Delta x = 0.5\,\text{cm}$ ، فإن،

$$\Delta p = -j\,0.005 \times 1000 \times 1.18 \times 0.01 = -j0.059\ \text{netwon/m}^2$$

فى الباب السادس من هذا الكتاب سيكون لدينا فرصة لرؤية تطبيق عملي لهذه المعادلات فى قياس سرعة الجسيم بواسطة ميكروفون.

الجزء الرابع - حلول معادلة الموجة

2-3 حلول عامة لمعادلة الموجة فى بعد واحد

تم استنتاج معادلة الموجة فى بعد واحد بواسطة ضغط الصوت أو بواسطة سرعة الجسيم كمتغير تابع. يمكن أيضاً استخدام إزاحة الجسيم أو الكثافة المتغيرة كمتغير تابع. يمكن رؤية هذا من المعادلات 2-4أ و 2-13أ و حفظ الكتلة، والتى تتطلب أن يظل حاصل ضرب الكثافة فى حجم صندوق صغير من الغاز مقدار ثابت. بمعنى أن،

$$\rho' \, V = \rho_0 \, V_0 = \text{contant} \qquad 2\text{-}25$$

ولذلك،

$$\rho' \, dV = -V \, d\rho' \qquad 2\text{-}26$$

بفرض،

$$\rho' \equiv \rho_0 + \rho \qquad 2\text{-}27$$

حيث ρ تغير تزايدى فى الكثافة. حينئذ، بالتقريب يمكن من المعادلات 2-8 و 2-26 الحصول على،

$$\rho_0 \tau = -V_0 p \qquad 2\text{-}28$$

بالتفاضل نحصل على،

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = -\frac{V_o}{\rho_o}\frac{\partial p}{\partial t}$$

لذلك من المعادلة 2-13أ نحصل على،

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\rho_o \frac{\partial u}{\partial x} \qquad 2\text{-}29$$

أيضاً، نعلم أن سرعة الجسيم هى معدل تغير إزاحة الجسيم بالنسبة للزمن.

$$u = \frac{\partial \xi_x}{\partial t} \qquad 2\text{-}30$$

من فحص المعادلات 2-4أ، 2-13أ، 2-29، و 2-30 يتبين أن ضغط، وسرعة الجسيم، وإزاحة الجسيم، والكثافة التزايدية ترتبط مع بعضها البعض بالمشتقات والتكاملات فى الفضاء والزمن.

هذه العمليات التى أجريت على معادلة الموجة لا تغير شكل الحل، كما سوف نرى بإيجاز. بما أن شكل الحل لم يتغير، فإنه يمكن استخدام نفس معادلة الموجة فى تعيين الكثافة، الإزاحة، أو سرعة الجسيم وكذلك ضغط الصوت عن طريق التعويض بـ ρ، أو ξ_x، أو u بدلا من p فى المعادلة 2-20أ، أو ρ، أو ξ، أو q بدلا من p فى المعادلة 2-20ب، بفرض أنه لا يوجد بالطبع دوران فى الوسط.

<u>حل عام</u>

باعتبار الضغط هو المتغير التابع فإن معادلة الموجة تكون على الصورة،

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \qquad 2\text{-}31$$

الحل العام لهذه المعادلة يكون عبارة عن مجموع من حدين على الصورة،

$$p = f_1\left(t - \frac{x}{c}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{c}\right) \qquad 2\text{-}32$$

حيث f_1 و f_2 دوال اختيارية. نفترض فقط أن لهذه الدوال تكون المشتقات الأولى والثانية متصلة. لاحظ أنه بما أن t و x تحدث معاً، فإن المشتقات الأولى بالنسبة لـ x و t تكون كما هى بالضبط ماعدا للعامل $\pm c$.

يجب أن تكون أبعاد النسبة $\frac{x}{c}$ أبعاد زمن، لذا فإن c تكون عبارة عن سرعة. من $c^2 = \gamma P_0 / \rho_0$ (المعادلة 2-19) نجد أن

$$c = \left(1.4 \times \frac{10^5}{1.18}\right)^{1/2} = 344.2 \ \text{m/sec} .$$

فى الهواء عند ضغط الوسط المحيط مقداره 10^5 newton/m^2 و 22^oC . هذه الكمية تساوى تقريباً القيمة المقاسة عملياً لسرعة الصوت 344.8 (أرجع للمعادلة 1-8)، لذلك نعترف بأن c هى السرعة التى تنتشر بها موجة الصوت خلال الهواء.

من الحل العام لمعادلة الموجة المعطاه فى المعادلة 2-32 نلاحظ حقيقتين فى غاية الأهمية:

1- يمكن فصل ضغط الصوت عند أى نقطة x إلى مركبتين: موجة خارجة، $f_1(t - x/c)$ وموجة تتحرك للخلف، $f_1(t + x/c)$.

2- بغض النظر عن شكل الموجة الخارجة (أو الموجة التى تتحرك للخلف) فإن الموجة تنتشر دون تغير فى الشكل. لبيان ذلك، دعنا نفترض أنه، عند $t = t_1$، يكون ضغط الصوت عند $x = 0$ هو $f_1(t_1)$. عند الزمن $t = t_1 + t_2$، تكون موجة الصوت قد سافرت مسافة x تساوى $t_2 c$ m. عند هذا الزمن الجديد يكون ضغط الصوت هو $p = f_1(t_1 + t_2 - t_2 c / c) = f_1(t_1)$. بكلمات أخرى، انتشر ضغط الصوت دون تغيير. يمكن تطبيق نفس المفهوم على الموجة العكسية والتى تتحرك فى اتجاه $-x$.

يجب فهم أنه يتأصل فى المعادلات 2-31 و 2-32 افتراضين. الافتراض الأول، هو أن الموجة

مستوية، بمعنى أنها لا تتسع جانبياً. بالتالى فإن ضغط الصوت لا يكون دالة فى محاور y و z ولكن فقط دالة فى المسافة على امتداد محور x. الافتراض الثانى هو عدم وجود فقد بالانتشار فى الهواء (أى تشتت الموجة بتدرجات الاضطراب أو درجة الحرارة، أو خلافه) لذلك لا تفقد الموجة طاقة أثناء الانتقال. لن يتم معالجة الحالات المبددة والمتفرقة تحليلياً فى هذا الكتاب.، ولكن سوف يتم مناقشتهما بشكل مختصر فى الأبواب 10 و 11.

حل الحالة المستقرة

تقريبا، فى كل الدراسات التى فعلناها فى هذا النص كان اهتمامنا بالحالة المستقرة. وكما هو معلوم من نظرية متسلسلة فوريير، يمكن تمثيل موجة الحالة المستقرة بمجموع خطى من دوال موجة-جيبية، لكل منها الشكل التالى،

$$\psi_\upsilon(t) = \sqrt{2}\left|\phi^\upsilon\right|\cos(\omega_\upsilon t + \theta_\upsilon) \qquad \text{2-33(أ)}$$

على سبيل المثال، إذا كانت ψ_υ ضغط الصوت، فإنه يمكننا كتابة،

$$p(t) = \sum_\upsilon p_\upsilon(t) = \sum_\upsilon \sqrt{2}\,\left|p^\upsilon\right|\,\cos\,(\omega_\upsilon t + \theta_\upsilon) \qquad \text{2-33(ب)}$$

حيث $\omega_\upsilon = 2\pi\, f_\upsilon$ ، و f_υ هو تردد الاهتزاز للمركبة رقم υ من الموجة، θ_υ زاوية طور هذه المركبة، و $\sqrt{2}\left|\phi^\upsilon\right|$ (أو $\sqrt{2}\left|p^\upsilon\right|$) مقدار ذروة المركبة. ولأن الموجة تنتقل دون تغير فى الشكل، فإننا نحتاج أن نعتبر، أنه فى الحالة المستقرة، أن هذه الحلول لمعادلة الموجة فقط هى التى يكون اعتماد الزمن فيها عند كل نقطة فى الفضاء اعتماد جيبى و الذي يكون لها نفس الترددات الزاوية ω_υ مثل المصدر.

وبالاستعارة من نظرية الدائرة الكهربية، يمكن تمثيل الدالة الجيبية التى لها تردد ω بجزء حقيقى لدالة آسية مركبة. بالتالى، عند نقطة ثابتة فى الفضاء x ، نحصل على ضغط الصوت على الصورة،

$$\psi(x,t) = \sqrt{2}\,\mathrm{Re}\left[\phi(x)\,e^{j\omega t}\right] \qquad \text{2-34(أ)}$$

$$p(x,t) = \sqrt{2}\,\mathrm{Re}\left[p(x)\,e^{j\omega t}\right] \qquad \text{2-34(ب)}$$

حيث $p(x)$ دالة مركبة (بمعنى أن لها جزء حقيقى وجزء تخيلى) تعطى اعتماد p على x. يكون

حصل ضرب $\sqrt{2}$ فى قيمة $p(x)$ هو قيمة ذروة دالة ضغط الصوت الجيبية عند x. زاوية طور $p(x)$ هى إزاحة الطور المقاس من مكان مرجعى ما. بشكل عام، تم إغفال كتابة Re (الجزء الحقيقى) بالرغم من أنه من المهم دائما تذكر أن الجزء الحقيقى يجب أن يؤخذ عند استخدام التعبير النهائى لضغط الصوت. لهذا، فى الحالة المستقرة، من الممكن أن نستبدل f_1 و f_2 فى المعادلة 2-32 بمجموع من دوال لكل منها تردد دفع زاوى خاص ω_υ، بالتالى

$$p(x,t)=\sum_{\upsilon} p_{\upsilon}(x,t)=\sum_{\upsilon}\sqrt{2}\,\mathrm{Re}\left[\left(p_{+}{}^{\upsilon}e^{-j\omega_{\upsilon}x/c}+p_{-}{}^{\upsilon}e^{j\omega_{\upsilon}x/c}\right)e^{j\omega_{\upsilon}t}\right] \qquad 2\text{-}35$$

الجزء الموجود بين الأقواس فى هذه المعادلة، يكون مثل الجزء الموجود بين الأقواس فى المعادلة 2-34. تم إدخال المعامل $\sqrt{2}$ لكى تمثل $p_{+}{}^{\upsilon}$ و $p_{-}{}^{\upsilon}$ جذر متوسط مربعات (rms) دوال مركبة متوسطة فى الزمن. يدل المدلول $+$ و $-$ على الموجات التى تنتقل فى الاتجاه الأمامى والاتجاه العكسى على الترتيب.

يتضح أن الحد الأول من المعادلة 2-35 يمثل الموجة الخارجة (المتقدمة) والتى لها جذر متوسط مربع القيمة $\left|p_{+}{}^{\upsilon}\right|$ لا يتغير مع الزمن t أو الموضع x. نفس الشيء صحيح بالنسبة للحد الثانى والذي يمثل الموجة المتحركة فى الاتجاه الخلفى.

جرت العادة (فى كتب الصوتيات) على تعريف العدد الموجى k على النحو،

$$k=\frac{\omega}{c}=\frac{2\pi f}{c}=\frac{2\pi}{\lambda} \qquad 2\text{-}36$$

أيضا، دعنا نسقط Re و المدلول υ من أجل التبسيط، عندئذ، سيصبح أى حد من حدود المعادلة 2-35 بعد هذه التغييرات على الصورة،

$$p(x,t)=\sqrt{2}[p(x)e^{j\omega t}]=\sqrt{2}\,(p_{+}e^{jk(ct-x)}+p_{-}e^{jk(ct+x)}) \qquad 2\text{-}37$$

بالمثل، يكون حل المعادلة 2-22أ، بفرض الحالة المستقرة، يكون على الصورة،

$$u(x,t)=\sqrt{2}\,(u_{+}e^{jk(ct-x)}+u_{-}e^{jk(ct+x)}) \qquad 2\text{-}38$$

من المفهوم أن الجزء الحقيقى من المعادلات 2-37 و 2-38 سوف يستخدم فى الحل النهائى. تتعين المقادير المركبة للكميات p_+ و p_- أو u_+ و u_- من الشروط الحدية.

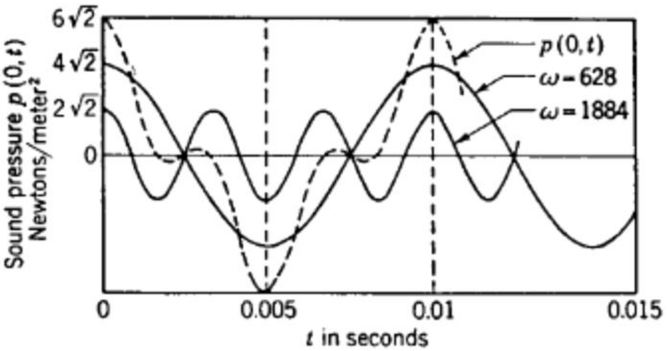
يتعين ج م م كل من الضغط المركب و سرعة الجسيم المركبة مباشرة من المعادلات 2-37 و 2-38 بإلغاء $\sqrt{2}\, e^{j\omega t}$ من الطرف اليمين. عندما تتحول الدالة المتبقية إلى مقدار وزاوية طور، فإن المقدار يكون الكمية التى سوف تظهر بواسطة مقياس ج م م الضغط-الصوت. لكن، لاحظ أنه عندما نأخذ الجزء الحقيقى لـ $p(x,t)$ أو $u(x,t)$ - فإن الكمية $\sqrt{2}\, e^{j\omega t}$ يجب أن تكون فى المعادلة إذا كان الهدف هو الحصول على القيم الصحيحة للضغط اللحظى وسرعة الجسيم.

المثال 2-2

افترض أنه فى الحالة المستقرة، عند النقطة $x = 0$ ، أن موجة ضغط الصوت المتقدمة فى بعد واحد لها الشكل المتكرر المبين بالنقط فى مخطط الضغط الصوتي التالى. يعطى شكل الموجة بالجزء الحقيقى من المعادلة،

$$p(0,t) = \sqrt{2}\,(4e^{j628t} + 2e^{j1884t})$$

(أ) ما هى سرعة وإزاحة الجسيم كدالة فى الزمن عند $x = 5\text{m}$ ؟ (ب) ما القيم الكمية لجذر متوسط المربعات، ج م م ؟ (ج) هل تعتمد قيم جذر متوسط المربعات على x ؟



مخطط اعتماد الضغط الصوتي على الزمن.

الحل

(أ)- حل معادلة الموجة عند قيم x و t (من المعادلة 2-37) نحصل على ،

$$p(x,t) = \sqrt{2}\,(4e^{j628(t-x/c)} + 2e^{j1884(t-x/c)})$$

من المعادلة 2-4أ نرى أن،

$$u(x,t) = \frac{-1}{j\omega\rho_o}\frac{\partial p(x,t)}{\partial x}$$

أو

$$u(x,t) = \frac{1}{\rho_o c}p(x,t)$$

ومن المعادلة 2-30 نحصل على،

$$\xi(x,t) = \frac{\sqrt{2}}{j\rho_o c}(\frac{4}{628}e^{j628(t-x/c)} + \frac{2}{1884}e^{j1884(t-x/c)})$$

عند $x = 5\text{m},\ x/c = 5/344.8 = 0.0145\text{sec}$ نحصل على

$$u(x,t) = \frac{\sqrt{2}}{407}(4e^{j628(t-0.0145)} + 2e^{j1884(t-0.0145)})$$

و

$$\xi(x,t) = \frac{\sqrt{2}}{407}(\frac{4}{628}e^{j[628(t-0.0145)-\pi/2)]} + \frac{4}{1884}e^{j[1884(t-0.0145)-\pi/2)]})$$

بأخذ الأجزاء الحقيقية فى المعادلات السابقة نحصل على،

$$u(x,t) = \frac{\sqrt{2}}{407}[4\cos(628t - 9.1) + 2\cos(1884t - 27.3)]$$

$$\xi(x,t) = \frac{\sqrt{2}}{407}[\frac{4}{628}\sin(628t - 9.1) + \frac{2}{1884}\sin(1884t - 27.3)]$$

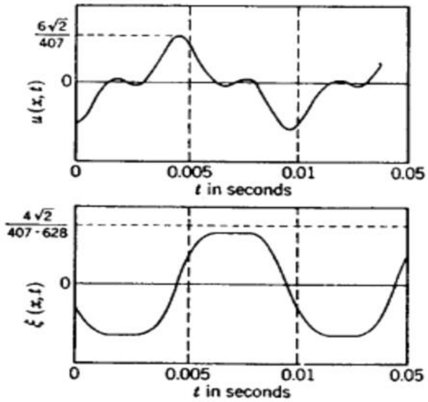
لاحظ أن كل حد فى إزاحة الجسيم يكون خارج الطور مع السرعة بـ 90 درجة، وأن شكل الموجة يكون مختلف. وكما قد يتوقع، فإن التفاضل يؤكد الترددات الأعلى. تم رسم هذه المعادلات في الشكل التالى.

(ب)- إن ج م م قيمة الموجة الجيبية يساوى قيمة الذروة مقسومة على $\sqrt{2}$. يمكن تحقيق هذا بتربيع الموجة الجيبية وإيجاد القيمة المتوسطة على طول دورة واحدة ثم أخذ الجذر التربيعى للناتج. إذا كانت الموجتين الجيبيتين ذات التردد المختلف موجودتين عند زمن واحد، فإن ج م م قيمة المجموع

يساوى الجذر التربيعى لمجموعات مربعات قيم جذر متوسط المربعات المنفردة، ولهذا،

$$u=\frac{1}{407}\sqrt{4^2+2^2}=0.011\text{m/sec}$$

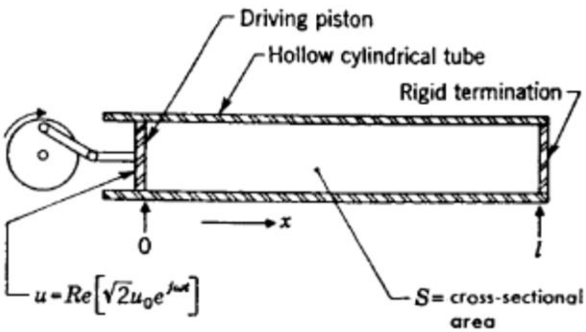
$$\xi_x=\frac{1}{407}\sqrt{\left(\frac{4}{628}\right)^2+\left(\frac{2}{1884}\right)^2}=1.58\times10^{-5}\ \text{m}$$



(ج)- قيم ج م م u و ξ_x لا تعتمد على x فى حالة موجة الصوت المستوية المتقدمة.

4-2 حل معادلة الموجة فى الهواء فى انبوب مغلق بشكل صلب.

فى هذا المثال لانتشار الموجة سوف نعتبر أنبوبة أسطوانية مجوفة أحد طرفيها يكون مغلق بحائط صلب والطرف الأخر بمكبس مستوى متذبذب (الشكل 2-3).



الشكل 2-3: أنبوبة لها نهايات صلبة. تكون قيمة السرعة عند $x=0$ هى
$\sqrt{2}\,u_o\cos\omega t\ \ \text{m/sec}$.

يكون التردد الزاوى للمكبس هو ω، و ج م م سرعته هو u_o. سنفترض أن قطر الأنبوبة يكون

صغير بحيث تنتقل الموجة على امتداد الأنبوبة بجبهات موجة مستوية. ولكي يكون ذلك حقيقياً، يجب أن تكون النسبة بين الطول الموجى للصوت وقطر الأنبوبة أكبر من 6 تقريباً.

سرعة الجسيم.

شكل الحل الذي سوف نختاره هو المعادلة 2-38. بفرض u_o تساوى ج م م سرعة المكبس المتذبذب عند $x=0$ ، و أن l تساوى طول الأنبوبة. الشروط الحدية هى

عند $x=0$ ، تكون $u(0,t)=\sqrt{2}\,u_o\,e^{j\omega t}$ لذلك، فإن $u_+ + u_- = u_o$.

عند $x=l$ ، تكون $u=0$ لذلك فإن،

$$u_+e^{-jkl}+u_-e^{jkl}=0. \qquad 2\text{-}39$$

تذكر أن، $\sin y=\dfrac{e^{iy}-e^{-iy}}{2j}$ بالتالى،

$$u_-=\frac{u_oe^{-jkl}}{-2j\sin kl}. \qquad 2\text{-}40$$

و

$$u_+=\frac{u_oe^{jkl}}{2j\sin kl}. \qquad 2\text{-}41$$

وبالتالى نحصل على،

$$u(x,t)=\sqrt{2}\,u_o\,e^{j\omega t}\frac{\sin k(l-x)}{\sin kl} \qquad 2\text{-}42$$

أو

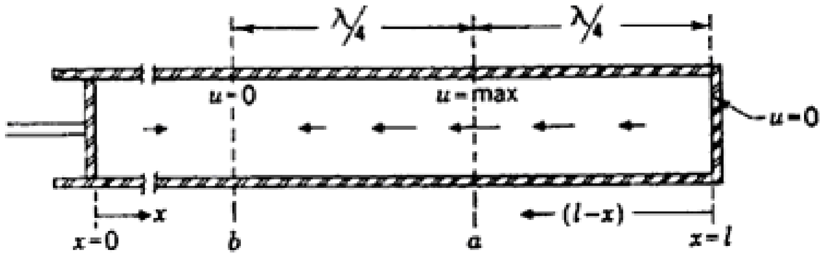
$$u=u_o\frac{\sin k(l-x)}{\sin kl} \qquad 2\text{-}43$$

لاحظ أن المقدار $\sqrt{2}$ و الآس الزمنى تم حذفهما فى المعادلة 2-43 لكى يكون كل من u_o و u ج

م م كميات مركبة متوسطه بالنسبة للزمن.

بالإشارة إلى الشكل 2-4، إذا تم الإبقاء على الطول l و التردد ثابتين فإن سرعة الجسيم ستتغير من قيمة الصفر عند $x=l$ إلى قيمة عظمى عند $l-x=\lambda/4$، أى عند $l-x$ تساوى ربع الطول الموجى. على كل طول الأنبوبة تتغير السرعة طبقاً لدالة الجيب. بين نهاية الأنبوبة ونقطة ربع الطول الموجى ($\lambda/4$) تكون الحركات التذبذية فى طور واحد. بمعنى أخر، لا توجد إزاحة طور متزايدة مع x. يسمى هذا النوع من الموجات بالموجة الموقوفة لأن، فى المعادلة، x و ct لا تحدثا كفرق أو كمجموع فى مناقشة الدالة الآسية. لذلك لا تنتشر الموجة.

فى المنطقة بين $l-x=\lambda/4$ و $l-x=\lambda/2$ ماتزال سرعة الجسيم لها نفس الطور ما عدا أن مقدارها يتناقص بشكل جيبى. عند $l-x=\lambda/2$، تكون سرعة الجسيم صفراً. فى المنطقة بين $l-x=\lambda/2$ و $l-x=\lambda$ تتغير سرعة الجسيم مع x طبقا للدالة الجيبية، لكن تتحرك الجسيمات 180 درجة خارج الطور مع تلك الموجودة فى المنطقة بين 0 و $\lambda/2$. يمكن رؤية هذا من المعادلة 2-43، لأن الحدود الجيبية للزاوية الأكبر من π تكون سالبة القيمة.



الشكل 2-4: جزء من الأنبوبة يبين اتجاه ومقدار حركة جزيئات الهواء كدالة فى $l-x$. عند الموضع a تكون سرعة الجزيء و إزاحته قيم عظمى، بينما عند الموضع b تكون السرعة والإزاحة صفراً.

عند تثبيت مكاننا عند بعض القيم الخاصة لـ x و تم الحفاظ على l ثابتة ، أثناء تغيير التردد، فإن كل من البسط والمقام فى المعادلة 2-43 سوف يتغيران. عندما يكون kl مضاعف صحيح للمقدار π ، فإن سرعة الجسيم سوف تصبح كبيرة جداً ما عدا عند $x=0$ أو عند النقط التى عندها يكون $k(l-x)$ مضاعف للمقدار π ، بمعنى أنه، عندما يكون $l-x$ مساوياً لمضاعفات $\lambda/2$. حينئذ ، فى حالة $kl=n\pi$،

$$l\big|_{u=\infty}=\frac{n\lambda}{2} \qquad n=1,2,3,.... \qquad \text{2-44}$$

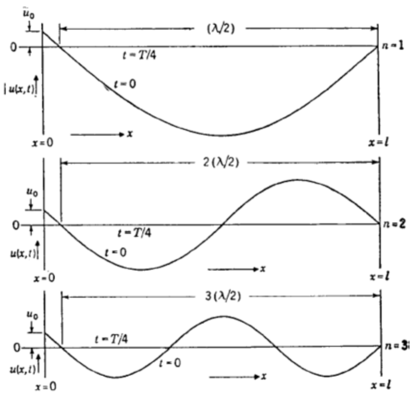
المعادلة 2-43 سوف تبين ج م م سرعة لانهائية تحت هذه الظروف. فى الواقع، إن وجود بعض التبديد فى الأنبوبة، والذي تم إهماله عند اشتقاق معادلة الموجة، سوف يحفظ سرعة الجسيم محددة، بالرغم من أنها تكون كبيرة.

سوف يكون ج م م سرعة الجسيم صفراً عند أجزاء الأنبوبة التى يكون عندها $k(l-x)=n\pi$ و n عدد صحيح أو صفر. (بالنسبة لنوع المصدر افترضنا أنه لا يوجد تبديد، وهذه الحالة لا تنطبق عند $kl=n\pi$) بمعنى أن

$$x\big|_{u=0}=l-\frac{n\lambda}{2} \qquad n=0,1,2,,.... \qquad 2\text{-}45$$

بكلمات أخرى، سوف توجد مستويات سرعة صفرية للجسيم عند نقط على امتداد طول الأنبوبة حيثما تكون l أكبر من $\lambda/2$.

يبين الشكل 2-5 بعض الأمثلة لسرعة الجسيم عند l اكبر بقليل من $\lambda/2$. بفحص هذه المنحنيات يظهر شيئان على وجه الخصوص. الأول، هو أن الكمية n تحدد العدد التقريبى لأنصاف الأطوال الموجية التى توجد بين نهايتى الأنبوبة. الشيء الثانى هو أنه عند u_o ثابتة، فإن أقصى سرعة للموجة فى الأنبوبة تعتمد على أى جزء من الموجة الجيبية يقع عند $x=0$. على سبيل المثال، عندما تكون $l-n\lambda/2=\lambda/4$، فإن أقصى سعة فى الأنبوبة ستكون مثلها عند المكبس. وإذا كانت $l-n\lambda/2$ قريبة جدا من الصفر، فإن أقصى سرعة فى الأنبوبة سوف تصبح كبيرة جداً.



الشكل 2-5: تغير سرعة الجسيم $u(x,t)$ عند $x=0$ كدالة فى المسافة على طول الأنبوبة المرسومة فى الشكل 2-3 لثلاثة ترددات، أى لثلاثة أطوال موجية. عند $x=0$ ، يكون ج م م سرعة الجسيم هو u_o، و عند $x=l$ ، تكون السرعة صفر. الزمن الدورى $T=1/f$.

دعنا نختار تردد وليكن $n=2$ ، كما هو مبين. تتعين ســـعة الدالة الجيبية فى الأنبوبة بعاملين إثنين. العامل الأول هو أنه، عند $x=0$ يجب أن يمر المنحنى الجيبيى خلال النقطة u_o. ثانياً، عند $x=l$ يجب أن يمر المنحنى الجيبيى خلال نقطة الصـــفر. من الواضـــح أنه يمكن رسم موجة جيبية واحدة فقط تحقق هذه الشروط لكي يمكن تعيين السعة. بالمثل يمكننا اختيار تردد مثل $n=2$ ، لكن بما أن طول الأنبوبة يكون أقل بقليل من ضـــعف أنصـــاف الأطوال الموجية. عندما تســـأل عن هذه الحالة، فإن الموجة الجيبية ســـوف تبدأ بميل موجب بدلاً من الميل السالب عند $x=0$.

ضغط الصوت

يمكن أيجاد ضغط الصوت من السرعة بمساعدة معادلة الحركة (المعادلة 2-4أ)، والتى تصبح فى الحالة المستقرة على الصورة،

$$p=-j\omega\rho_o\int u\,dx \qquad 2\text{-}46$$

يجب أن يكون ثابت التكامل فى المعادلة 2-46 الناتج من تكامل المعادلة 2-4أ غير معتمد على x ، لأننا أجرينا التكامل بالنسبة إلى x . لذلك، فإن الثابت يمثل زيادة صغيرة فى الضغط المحيط لكل الوسط الذي تمر الموجة خلاله. لا توجد مثل هذه الزيادة الصغير فى حالة الأنبوبة التى لدينا، لذلك، فى المعادلة 2-46 وضعنا ثابت التكامل يساوى صفر. بتكامل المعادلة 2-46 بعد أن نستبدل u بقيمتها من المعادلة 2-42 نحصل على،

$$p(x,t)=-j\,\rho_o\,c\sqrt{2}\,u_o\,e^{j\omega t}\,\frac{\cos k(l-x)}{\sin kl} \qquad 2\text{-}47$$

أو

$$p=-j\,\rho_o\,c\,u_o\,\frac{\cos k(l-x)}{\sin kl} \qquad 2\text{-}48$$

لاحظ أنه تم حذف $\sqrt{2}$ و الآس الزمنى من المعادلة 2-48 لكى تكون كل من p و u ج م م كميات مركبة متوسطة بالنسبة للزمن.

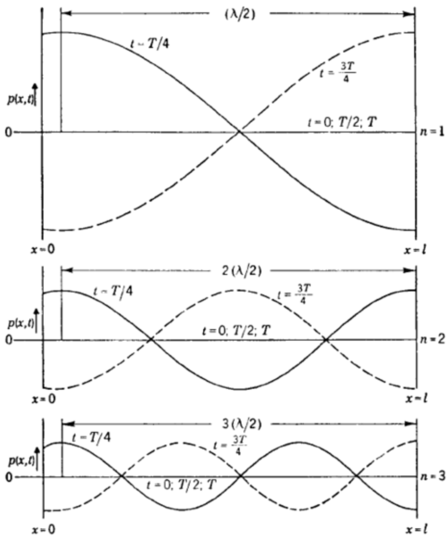
سوف يكون ج م م الضغط p صفراً عند نقط الأنبوبة التى عندها يكون $k(l-x)=n\pi+\pi/2$

، حيث n عدد صحيح أو صفر.

$$x|_{p=0} = l - \frac{\lambda}{2}\left(n + \frac{1}{2}\right) \qquad \text{2-49}$$

سوف يكون الضغط صفراً عند مستوى أو أكثر فى الأنبوبة عندما تكون l أكبر من $\lambda/4$. يبين الشكل 2-6 بعض الأمثلة. هنا مرة أخرى، الكمية n تساوى تقريباً عدد أنصاف الأطوال الموجية فى الأنبوبة.

بالإشارة مرة أخرى للشكل 2-5 والذي رسم فى حالة $t = 0$، تكون السرعة اللحظية للجسيم عند قيمتها العظمى (كدالة فى الزمن). بالمقارنة، فى الشكل 2-6 عند $t = 0$، يكون الضغط اللحظى للصوت صفراً. عند الزمن اللاحق $t = T/4 = \frac{1}{4}f$ تصبح السرعة اللحظية للجسيم صفراً ويصل الضغط اللحظى للصوت إلى قيمته العظمى. تنص المعادلات 2-42 و 2-47 على أنه حيثما يكون $k(l-x)$ عدد صغير فإن ضغط الصوت يتأخر بمقدار ربع الزمن الدورى عن سرعة الجسيم. عند بعض المواضع الأخرى فى الأنبوبة، على سبيل المثال عندما تقع $k(l-x)$ بين $\lambda/4$ و $\lambda/2$، فإن ضغط الصوت يسبق سرعة الجسيم بمقدار ربع الزمن الدورى.



الشكل 2-6 تغير ضغط الصوت $p(x,t)$ كدالة فى المسافة على امتداد طول الأنبوبة لثلاثة ترددات. بمعنى أن ثلاثة أطوال موجية. عند $x = 0$ ، فإن ج م م سرعة الجسيم تكون u_o، وعند $x = l$ تكون صفر. زمن الدورة يساوى $1/f$.

لرؤية العلاقة بين p و u بوضوح أكثر، ارجع للأشكال 2-5 و 2-6، فى حالة $n=2$. فى الشكل 2-5، تكون حركة الجسيم إلى اليمين عندما تكون u موجبة وإلى اليسار عندما تكون سالبة. بما أنه، عند النقطة $2\lambda/2$ تتحرك الجسيمات على الجانين نحو بعضها البعض، لذلك بعد ربع دورة سوف يتم بناء ضغط الصوت إلى قيمة عظمى، كما يمكن أن يرى من الشكل 2-6. عند $(l-x)=\lambda/2$ ، تتحرك الجسيمات مبتعدة لكى يكون الضغط منخفضاً عن الضغط البارومترى، كما يرى من الشكل 2-6.

الأشكال 2-5 و 2-6 تبين أيضاً أنه، على طول الأنبوبة حيثما يكون مقدار السرعة صفراً، فإن قيمة الضغط تكون قيمة عظمى، والعكس بالعكس صحيح. لذلك، بالنسبة لأعظم ضغط، فإن المعادلة 2-45 تنطبق.

<u>المعاوقة الصوتية النوعية</u>

يبقى لنا الحل بالنسبة المعاوقة الصوتية النوعية Z_s عند أى مستوى x فى الأنبوبة. بأخذ النسبة بين المعادلتين 2-48 إلى 2-43 نحصل على،

$$Z_s=\frac{p}{u}=-j\,\rho_o\,c\,\cot\,kl'=j\,X_s\quad \text{mks rayls} \qquad \text{2-50}$$

حيث X_s المفاعلة.

حيث وضعنا

$$l-x=l' \qquad \text{2-51}$$

بمعنى أن l' هى المسافة بين أى مستوى x فى الشكل 2-3 ونهاية الأنبوبة عند l. تدل $-j$ على أنه عند الترددات المنخفضة (حيث تكون متسلسلة ظل التمام $\cot kl'\approx\frac{1}{kl'}$) فإن سرعة الجسيم تسبق الضغط كدالة فى الزمن بزاوية 90 درجة و تكون المفاعلة X_s سالبة. عند كل الترددات تكون المعاوقة عبارة عن مفاعلة وربما تسبق أو تتأخر عن الضغط بزاوية 90 درجة بالضبط، وهذا يعتمد على ما إذا كانت X_s سالبة أو موجبة على وجه الترتيب. تتغير المفاعلة X_s كما هو مبين بالشكل 2-7. إذا كانت القيمة kl' صغيرة، يمكننا تقريب ظل التمام بالحدين الأولين من متسلسلة ماكلورين

كالاتى.

$$\cot kl' \approx \frac{1}{kl'} - \frac{kl'}{3}. \qquad 2\text{-}52$$

يصلح هذا التقريب حينما يكون حاصل ضرب التردد فى المسافة من النهاية المغلقة للأنبوبة إلى نقطة القياس صغير جداً. وإذا كان الحد الثانى صغير جداً حينئذ يمكن إهماله مقارنة مع الحد الأول.

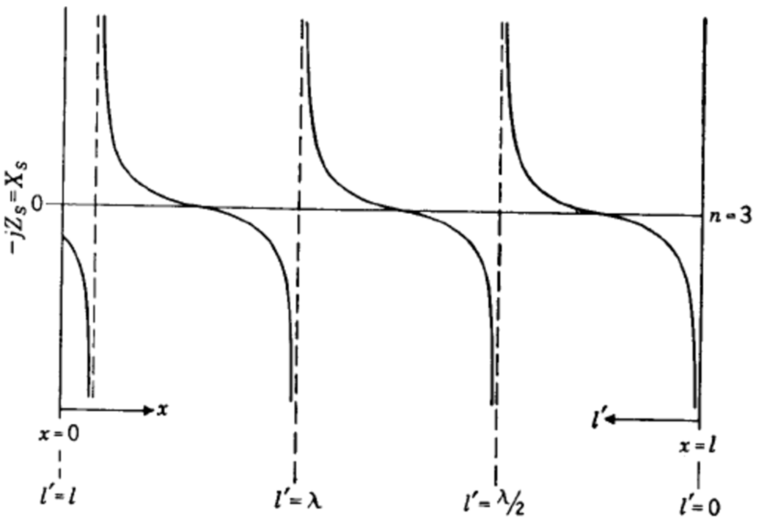
دعنا نرى كيف أن النسبة بين المسافة l' و الطول الموجى تكون صغيرة إذا كان الحد الثانى فى المعادلة 2-52 يمثل ثلاثة فى المائة أو أقل من الحد الأول. بمعنى دعنا نحل بالنسبة لـ l'/λ من

$$\frac{2\pi l'}{3\lambda} \le 0.03\,\frac{\lambda}{2\pi l'} \qquad 2\text{-}53$$

ومنها نحصل على

$$\frac{l'}{\lambda} \le 0.05 \qquad 2\text{-}54$$

بكلمات أخرى، إذا تم استبدال $\cot kl'$ بالحد الأول من متسلسلة مفكوكها (بدقة تساوى 3%)، فإن l' يجب أن تكون أقل من $\frac{1}{20}$ أو 5% من قيمة الطول الموجى.



الشكل 2-7: المفاعلة النوعية للصوت (p_{rms}/u_{rms}) على امتداد طول الأنبوبة المبينة فى الشكل 2-3 عند تردد معين، أى عند طول موجى معين حيث $3(\lambda/2)$ أقل بقليل من طول الأنبوبة l. لهذه الحالة، يكون عدد الأصفار 3 ويكون عدد الأقطاب 4.

بفرض أن $l' < \lambda / 20$ فإن المعادلة 2-50 تصبح،

$$Z_s = j\,X_s = -j\,\frac{\rho_o c}{kl'} = \frac{1}{j\,\omega(l'/\rho_o c^2)} \equiv \frac{1}{j\,\omega C_s} \quad \text{mks rayls} \qquad 2\text{-}55$$

بالتالى، يمكن تمثيل المعاوقة النوعية للصوت للأنبوبة القصيرة الطول "بسعة"، تسمى المطاوعة النوعية للصوت، مقدارها $C_s = \frac{l'}{\rho_o C^2}$. لاحظ أيضاً أن $C_s = \frac{l'}{\gamma P_o}$، بسبب المعادلة 2-19.

المعاوقة الصوتية هى نفس الشيء أيضاً، ما عدا أن معامل المساحة يظهر فى التعبير بحيث،

$$Z_A = \frac{p}{S\,u} = \frac{1}{j\,\omega(V/\rho_o\,c^2)} \equiv \frac{1}{j\omega C_A{}^2} \qquad 2\text{-}56$$

حيث $V = l'/S$ هو الحجم و S مساحة مقطع الأنبوبة. C_A تسمى المطاوعة الصوتية وتساوى $V/\rho_o c^2$. لاحظ أيضاً أن $C_A = \frac{V}{\gamma P_o}$ من المعادلة 2-19.

<u>المثال 2-3</u>

تستخدم أنبوبة اسطوانية فى جهاز صوتى كعنصر معاوقة. (أ) إذا كانت المعاوقة المطلوبة هى قيمة المطاوعة، فما الطول الذي يجب أن يعطى مفاعلة مقدارها 1.4×10^3 mks rayls عند تردد زاوى 1000 قطرى/ث؟ (ب) ما المقدار النسبى للحد الأول والثانى من المعادلة 2-52 فى هذه الحالة؟

<u>الحل</u>

تكون مفاعلة هذه الأنبوبة هى

(أ)
$$X_s = 1.4 \times 10^3 = \frac{\gamma P_o}{\omega l'} = \frac{1.4 \times 10^5}{10^3\ l'}$$

بالتالى $l' = 0.1$ m.

(ب)
$$\frac{kl'}{3} \div \frac{1}{kl'} = \frac{k^2 l'^2}{3} = \frac{\omega^2 l'^2}{3c^2} = \frac{10^5 \times 10^{-2}}{(3)(344.8)^2} = 0.028$$

بالتالى يكون الحد الثانى حوالي 3% من قيمة الحد الأول.

5-2 موجة مستوية تنتقل بحرية

ضغط الصوت

إذا تم استبدال النهايات الصلبة فى الشكل 2-3 بنهايات تامة الامتصاص، فإن الموجة المرتجعة (أى التى تتحرك فى الاتجاه العكسى) سوف لا تحدث. بالتالى تصبح المعادلة 2-37 على الصورة،

$$p(x,t) = \sqrt{2}\, p_+ e^{jk(ct-x)} \qquad 2\text{-}57$$

حيث p_+ هو ج م م القيمة المركبة للموجة. تنطبق هذه المعادلة أيضاً على الموجة المستوية التى تسافر فى الفضاء الحر.

سرعة الجسيم

من المعادلة 2-4أ فى الحالة المستقرة نحصل على

$$u = -\frac{1}{j\omega\rho_o}\frac{\partial p}{\partial x} \qquad 2\text{-}58$$

بالتالى،

$$u(x,t) = \frac{\sqrt{2}\, p_+}{\rho_o c} e^{jk(ct-x)} = \frac{p(x,t)}{\rho_o c} \qquad 2\text{-}59$$

لاحظ أن سرعة الجسيم وضغط الصوت فى طور واحد، وهذا هو البرهان الرياضى للحديث المتعلق بالمناقشة النوعية للحائط المتذبذب في الباب الأول والشكل 1-1.

المعاوقة الصوتية النوعية.

تعرف المعاوقة الصوتية النوعية على الصورة التالية،

$$Z_s = \frac{p}{u} = \rho_o c \quad \text{mks rayls} \qquad 2\text{-}60$$

تنص هذه المعادلة على أنه فى حالة الموجة المستوية التى تسافر بحرية تكون المعاوقة الصوتية النوعية مقاومية نقية وتساوى حاصل ضرب الكثافة المتوسطة للغاز وسرعة الصوت. بشكل عام، تسمى هذه الكمية الخاصة بالمعاوقة المميزة للغاز لأن مقدارها يعتمد على خصائص الغاز وحده.

إنها كمية تماثل معاوقة الاندفاع لخط كهربى لا نهائى. بالنسبة للهواء عند $22\,^{o}\mathrm{C}$ وضغط جوى يساوى 10^5 newton/m^2، تكون قيمتها 407 mks rayls .

2-6 موجة كروية تنتقل بحرية

ضغط الغاز

يكون حل معادلة الموجة الكروية (2-24) على الصورة،

$$p(r,t) = \sqrt{2}\left(\frac{A_+\,e^{-jkr}}{r} + \frac{A_-\,e^{+jkr}}{r}\right)e^{j\omega t} \qquad 2\text{-}61$$

حيث A_+ قيمة ج م م ضغط الصوت للموجة المتقدمة عند وحدة مسافة من مركز الكرة و A_- قيمة ج م م ضغط الصوت لنفس الموجة المنعكسة .

إذا لم توجد سطوح عاكسة فى الوسط فإننا نحتاج فقط إلى الحد الأول من هذه المعادلة، بمعنى،

$$p(r,t) = \sqrt{2}\,\frac{A_+\,e^{-jkr}}{r}\,e^{j\omega t} \qquad 2\text{-}62$$

سرعة الجسم.

بمساعدة المعادلة 2-4ب نحل بالنسبة لسرعة الجسيم فى اتجاه r .

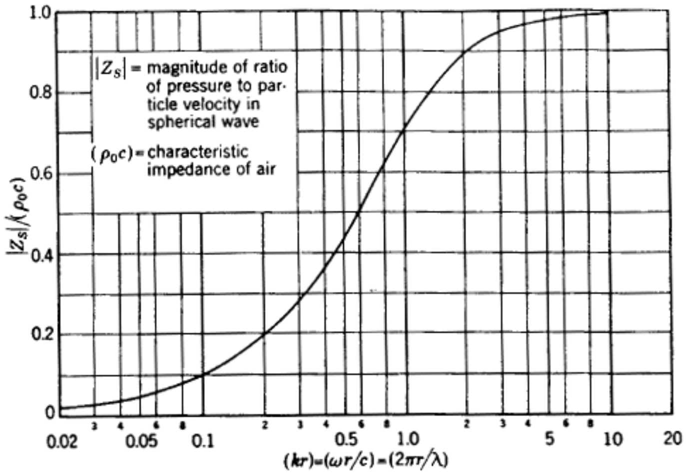
$$u(r,t) = \frac{\sqrt{2}\,A_+}{\rho_o\,c\,r}\,e^{j\omega t}\left(1 + \frac{1}{jkr}\right)e^{-jkr} \qquad 2\text{-}63$$

المعاوقة الصوتية النوعية.

يمكن إيجاد المعاوقة الصوتية النوعية بقسمة المعادلة 2-62 على المعادلة 2-63،

$$Z_s = \frac{p}{u} = \rho_o\,c\,\frac{jkr}{1 + jkr} = \frac{\rho_o\,c\,k\,r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}}\angle(90^o - \tan^{-1} kr) \quad \text{mks rayls} \qquad 2\text{-}64$$

تبين الأشكال 2-8 و 2-9 رسومات مقدار وزاوية طور المعاوقة كدالة فى kr . كما تم رسم الجزء الحقيقى والجزء التخيلى لـ R_s و X_s فى الشكل 2-10



الشكل 2-8 رسم مقدار نسبة المعاوقة النوعية للصوت $|Z_s|/\rho_o c$ فى موجة كروية تنتقل بحرية كدالة فى kr، حيث k العدد الموجى ويساوى ω/c أو $2\pi/\lambda$ و $|Z_s|$ مقدار نسبة ضغط الصوت إلى سرعة الجسيم فى موجة كروية تنتقل بحرية، و $\rho_o c$ المعاوقة المميزة للهواء.

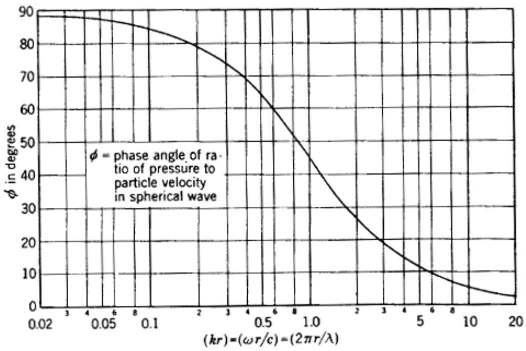
بالنسبة للقيم الكبيرة لـ kr، بمعنى أنه فى حالة المسافة الكبيرة، أو فى حالة الترددات العالية، فإن هذه المعادلة تصبح بالتقريب على الصورة،

$$Z_s \approx \rho_o c \text{ mks rayls} \qquad 2\text{-}65$$

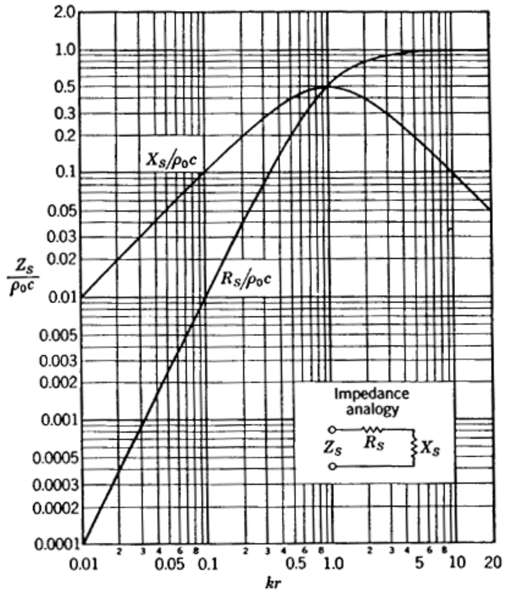
تكون المعاوقة هنا مقاومية نقية تقريباً وتساوى بالتقريب المعاوقة المميزة للموجة المستوية التى تنتقل بحرية. بمعنى أخر، تكون المعاوقة النوعية للصوت على مسافة كبيرة من المصدر الكروى فى الفضاء الحر تكون مساوية تقريباً لتلك الموجودة فى الأنبوبة التى لا يحدث فيها انعكاس عند النهاية المقابلة للمصدر.

تعتبر المعادلات 2-62 و 2-63 مهمة لأنها تبين الفرق بين الاستجابات للميكروفون الحساس - للضغط و حساسية الميكروفون لسرعة الجسيم عندما يوضع الميكروفون قريباً من مصدر كروى صغير للصوت عند ترددات مختلفة. ومع جعل r أصغر، فإن خرج الميكروفون المستجيب للضغط سوف يتضاعف لكل تنصيف للمسافة بين الميكروفون والمصدر الكروى (أنظر قانون التربيع العكسى، المترجمون). وعند التعبير عن ذلك بوحدات الديسيبل، فإن الخرج يزداد 6 ديسيبل عند كل نصف مسافة. بالنسبة للميكروفون الحساس - للسرعة، فإن تغير الخرج ليس بهذه البساطة. فقط عند المسافات الكبيرة بشكل كافى ($k^2r^2 >> 1$) فإن الخرج يزداد 6 ديسيبل لكل تنصيف للمسافة. فى

حالة المسافة الأقصر، فإن الحد الثانى بين الأقواس فى الجانب الأيمن للمعادلة 2-63 يصبح كبيراً، ويزداد مقدار u بمعدل يزيد عن 6 ديسيبل لكل تنصيف للمسافة.



الشكل 2-9 رسم زاوية الطور بالدرجات لنسبة المعاوقة النوعية للصوت $Z_s/\rho_o c$ فى موجة كروية تنتقل بحرية كدالة فى kr، حيث k العدد الموجى ويساوى ω/c أو $2\pi/\lambda$ و r المسافة من مركز المصدر الكروى.



الشكل 2- 10 الأجزاء الحقيقية والتخيلية للمعاوقة النوعية المطبعة (المسواة) للصوت $Z_s/\rho_o c$ لتحميل الهواء على كرة نابضة نصف قطرها r موضوعة فى الفضاء الحر. تم رسم التردد على تدريج مطبع حيث $kr = 2\pi fr/c = 2\pi r/\lambda$. لاحظ أيضاً أن المحور الرأسى $Z_s/\rho_o c$ يساوى $Z_M/\rho_o cS$، حيث Z_M هى المعاوقة الميكانيكية، و $Z_A S/\rho_o c$، حيث Z_A المعاوقة الصوتية. الكمية S هى المساحة التى يتم تعيين المعاوقة لها، و $\rho_o c$ هى المعاوقة المميزة للوسط.

عند المسافات القصيرة جداً $(k^2r^2 << 1)$، فإن معدل زيادة u يصل إلى حد +12 ديسيبل لكل تنصيف للمسافة. لهذا السبب نجد أن صوت المغني الإذاعي يصبح مميز التردد (أكثر جهورية) عندما يغني بالقرب جدا من ميكروفون حساس-للسرعة والمصمم بحيث تكون أفضل استجابة له عندما يوضع بعيد جداً من مصدر الصوت.

الجدول 2-1 العلاقات العامة وعلاقات الحالة المستقرة لانتشار إشارة صوتية صغيرة فى الغازات.

الأسم Name	المعادلة العامة General equation	معادلة الحالة الثابتة Steady-state equation
Wave equations معادلات الموجة	$\frac{\partial^2(\ )}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2(\ )}{\partial t^2}$ $\nabla^2(\ ) = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2(\ )}{\partial t^2}$ $\frac{\partial^2(pr)}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2(pr)}{\partial t^2}$	$\frac{\partial^2(\ )}{\partial x^2} = -\frac{\omega^2}{c^2}(\ )$ $\nabla^2(\ ) = -\frac{\omega^2}{c^2}(\ )$ $\nabla^2(pr) = -\frac{\omega^2}{c^2}(pr)$
Equation of motion معادلة الحركة	$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0\frac{\partial u}{\partial t}$ $\text{grad } p = -\rho_0\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t}$	$u = \frac{-1}{j\omega\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x}$ $p = -j\omega\rho_0\int u\,dx$ $\text{grad } p = -j\omega\rho_0\mathbf{q}$
Displacement الأزاحة	$\xi = \int u\,dt$ $\xi = \int \mathbf{q}\,dt$	$\xi = \frac{u}{j\omega}$ $\xi = \frac{\mathbf{q}}{j\omega}$
Incremental density الكثافة التزايدية	$\rho = \frac{\rho_0}{\gamma P_0}p = \frac{p}{c^2}$ $\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0\frac{\partial u}{\partial x}$	$\rho = \frac{\rho_0}{\gamma P_0}p = \frac{p}{c^2}$ $\rho = -\frac{\rho_0}{j\omega}\frac{\partial u}{\partial x}$
Incremental temperature درجة الحرارة التزايدية	$\Delta T = \frac{T_0}{P_0}\frac{\gamma - 1}{\gamma}p$	$\Delta T = \frac{T_0}{P_0}\frac{\gamma - 1}{\gamma}p$

الشيء المهم الأخر الذي نتعلمه من المعادلة 2-64 هو أنه، عند الترددات المنخفضة يكون من الصعب جداً إشعاع الطاقة الصوتية من السماعة الصغيرة. يمكن ربط السماعة الصغيرة بمضخم (بالون) له نصف قطر صغير r. المعاوقة الصوتية النوعية Z_s للهواء ممثلة لكل سم^2 من المضخم تعطى بالمعادلة 2-64 والشكل 2-10. عند الترددات المنخفضة، تصبح المعاوقة مفاعلية نقية تقريباً وتصبح المقاومة صغيرة جداً. لذلك، فإن القدرة المنبعثة بسماعة صغيرة تصبح صغيرة جداً. عند الترددات الأعلى، $kr > 2$، تصبح المعاوقة الصوتية النوعية Z_s مقاومية نقية تقريباً ولها قيمة عظمى تساوى $\rho_o c$، لكى تصل القدرة المنبعثة لقيمة معينة لـ p_+ قيمتها العظمى. تم تلخيص العلاقات المهمة

للحالة المستقرة المذكورة فى هذا الباب فى الجدول 2-1.

الجزء الخامس - كثافة وشدة الطاقة

2-7 كثافة الطاقة

تعتبر كثافة الطاقة من المفاهيم المهمة فى علم الصوتيات، فيما يتعلق بالصوت فى المرافق، كما أنه ضرورى فى دراسة تدفق الطاقة من المصدر إلى جميع أجزاء الغرفة. تكون كثافة الطاقة (أى الواط - ثانية لوحدة الحجم) أكبر بالقرب من المصدر منه عند المسافة البعيدة، ويكون هى المتغير الذي يظهر فى المعادلات التى تصف الظروف الصوتية. على الجانب الأخر، تستجيب الأذن وكل مقاييس مستوى الصوت الأخرى لـ ج م م الضغط. لذلك نحتاج إلى التحقق من العلاقة بين كثافة الطاقة وضغط الصوت فى المجالات الصوتية.

تكون كثافة الطاقة المصاحبة "لصندوق" صغير من الغاز عند لحظة معينة عبارة عن المجموع الجبرى لطاقات الحركة والوضع لوحدة الحجوم من جسيمات الهواء فى الصندوق. تكون كثافة طاقة الحركة نتيجة الزيادة فى ضغط الموجة الصوتية، D_{KE} ، على الصورة،

$$D_{KE} = \frac{1}{2}\frac{Mu^2}{V_o} = \frac{1}{2}\rho_o u^2 \qquad 2\text{-}66$$

حيث u متوسط السرعة اللحظية لجسيمات الهواء فى الصندوق، ρ_o متوسط الكثافة، و M/V_o هى الكتلة لوحدة الحجوم.

يمكن إيجاد كثافة طاقة الوضع نتيجة موجة الصوت، D_{PE} ، من قانون الغاز. فى حالة التغيرات الصغيرة جداً فى حجم الصندوق، يمكننا كتابة (أرجع للمعادلة 2-8)،

$$D_{PE} = -\frac{\int p\, d\tau}{V_o} \qquad 2\text{-}67$$

بتفاضل المعادلة 2-9 والتعويض عن $d\tau$ ، نحصل على كثافة طاقة الوضع على الصورة،

$$D_{PE} = \frac{\int p\, dp}{\gamma P_o} = \frac{1}{2}\frac{p^2}{\gamma P_o} \qquad 2\text{-}68$$

عندما يساوى ضغط الغاز p الصفر، فإن طاقة الوضع نتيجة الموجة الصوتية يجب أن تكون صفر. لذلك يكون ثابت التكامل الاختياري هو صفر أيضاً.

تكون كثافة الطاقة الكلية نتيجة موجة الصوت ، $D = D_{KE} + D_{PE}$ ، أو

$$D(t) = \frac{1}{2}\left(\rho_o u^2 + \frac{p^2}{\gamma P_o}\right) \qquad 2\text{-}69$$

تكون هذه المعادلة حقيقية فى أى لحظة عند النقطة المعطاة فى الفضاء.

8-2 كثافة الطاقة فى الموجات المستوية.

<u>كثافة الطاقة لموجة مستوية متقدمة – بحرية.</u>

من المعادلات 2-57 و 2-59 رأينا أن ضغط وسرعة الجسيم فى الموجة المستوية المتقدمة – بحرية تعطى بالمعادلات:

$$p(x,t) = \text{Re}\sqrt{2}\, p_+ e^{jk(ct-x)} = \sqrt{2}\left|p_+\right|\cos[k(ct-x)+\theta] \qquad 2\text{-}70$$

$$u(x,t) = \text{Re}\frac{\sqrt{2}\, p_+}{\rho_o c} e^{jk(ct-x)} = \frac{\sqrt{2}\, p_+}{\rho_o c}\cos[k(ct-x)+\theta] \qquad 2\text{-}71$$

حيث $p_+ = \left|p_+\right| e^{j\theta}$.

تكون كثافة الطاقة اللحظية لتلك الموجة فى الحالة المستقرة (من المعادلات 2-68 و 2-17) على الصورة،

$$\begin{aligned} D(x,t) &= \left|p_+\right|^2\left(\frac{\rho_o}{\rho_o^{\,2} c^2} + \frac{1}{\rho_o c^2}\right)\cos^2[k(ct-x)+\theta] \\ &= \frac{2\left|p_+\right|^2}{\rho_o c^2}\,\frac{1+\cos 2\omega(t-x/c+\theta/\omega)}{2} \qquad 2\text{-}72 \\ &= \frac{\left|p_+\right|^2}{\rho_o c^2}\,[1+\cos 2\omega(t-x/c+\theta/\omega)] \end{aligned}$$

تنص هذه المعادلة على أنه بالنسبة للموجة المستوية المتقدمة بحرية، عند كل الأزمنة، تكون كثافات طاقتى الحركة والوضع متساويتان عند نقطة ما فى الفضاء، لكنهما تتغيران مع المكان أو الزمن لحظياً من الصفر إلى ضعف قيمتهما المتوسطة. الحالة هنا مختلفة عنها فى البندول، حيث تتغير طاقة الحركة وطاقة الوضع فى طور معاكس، بمعنى أن، تكون إحداهما قيمة عظمى عندما تكون الأخرى قيمة صغرى. هنا، تنتقل الطاقة فى اتجاه يبتعد عن المصدر. فى المقابل، يكون البندول عبارة عن نظام محافظ.

عند أخذ المتوسط بالنسبة لطول زمن يساوى $t = T/2 = 1/2f$ أو بالنسبة لمسافة فى الفضاء تساوى $x = \lambda/2 - c/2f$ ، نجد أن متوسط كثافة الطاقة يكون مساوياً لـ

$$D_{avg} = \frac{|p_+|^2}{\rho_o c^2} \quad \text{watt} - \text{sec/m}^3 \qquad 2\text{-}73$$

حيث $|p_+|$ مقدار جذر المتوسط الزمنى لمربعات قيمة الضغط الصوتى المقاسة عند أى نقطة فى الموجة الصوتية. لاحظ أيضاً أن $\rho_o c^2 \equiv \gamma P_o$ كما ذكرنا من قبل. بفحص المعادلة 2-60 يتبين أنه يمكننا وضع،

$$\frac{p_+}{\rho_o c} \equiv u_+ \qquad 2\text{-}74$$

حيث u_+ هو قيمة ج م م (فى الزمن) للسرعة عند أى نقطة فى الموجة. حينئذ،

$$D_{avg} = |u_+|^2 \rho_o \qquad 2\text{-}75$$

تعطى المعادلات 2-73 و 2-75 العلاقات بين ج م م ضغط و سرعة الجسيم، وكثافة الطاقة.

<u>كثافة الطاقة فى موجة موقوفة مستوية.</u>

من المعادلات 2-.42 و 2-47 نحصل على،

$$p(x,t) = \sqrt{2}\,\rho_o c |u_o| \frac{\sin(\omega t + \theta)\cos k(l - x)}{\sin kl} \qquad 2\text{-}76$$

حيث θ هى زاوية طور u_o.

$$u(x,t)=\sqrt{2}\ |u_o|\ \frac{\cos(\omega t+\theta)\sin k(l-x)}{\sin kl} \qquad 2\text{-}77$$

فى هذه الحالة، تكون طاقة الحركة وطاقة الوضع خارج طور الزمن بمقدار 90^{o}. هذه الحالة تماثل حالة البندول لأن كلتاهما حالات محافظة.

تكون كثافة الطاقة اللحظية لمثل هذه الموجة فى الحالة المستقرة (من المعادلات 2-69 و 2-19) على الصورة،

$$D(x,t)=|u_o|^2\ \rho_o\ \frac{1-\cos\ 2(\omega t+\theta)\cos\ 2k(l-x)}{1-\cos\ 2kl} \qquad 2\text{-}78$$

عند أخذ المتوسط على فترة زمنية t تساوى $T/2$ أو على طول مسافة فى الفضاء x تساوى $\lambda/2$ ، نجد أن متوسط كثافة الطاقة يساوى،

$$D_{avg}=\frac{|u_o|^2\ \rho_o}{1-\cos\ 2kl}\quad \text{watt}-\sec/\text{m}^3 \qquad 2\text{-}79$$

حيث $|u_o|$ مقدار ج م م قيمة سرعة المكبس عند $x=0$. تبين هذه المعادلة أنه، عند قيمة ثابتة $|u_o|$ ، يتغير متوسط كثافة الطاقة من $|u_o|^2\ \rho_o/2$ إلى ما لانهاية طبقاً لقيمة $kl=2\pi l/\lambda$.

تكون الطريقة الأفضل لتمثيل متوسطة كثافة الطاقة بدلالة ج م م الضغط. من التعريف، إذا فرضنا أن ج م م قيمة الضغط يرتبط بج م م السرعة u_o عند $x=0$ بالعلاقة

$$p_1\equiv\frac{\rho_o\, c\, u_o}{\sin kl} \qquad 2\text{-}80$$

نحصل على

$$p(x,t)=\sqrt{2}\,|p_1|\ \sin(\omega t+\theta)\cos k(l-x) \qquad 2\text{-}81$$

فإن المعادلة 2-79 تصبح على الصورة

$$D_{avg}=\frac{|p_1|^2}{2\rho_o c^2} \qquad 2\text{-}82$$

هنا، $|p_1|$ مقدار قيمة جذر متوسط المربعات (بالنسبة للزمن) للقيمة القصوى (فى الفضاء) لضغط الصوت. إذا قمنا بقياس قيمة ج م م ضغط الصوت فى الفضاء بواسطة ميكروفون متحرك إلى الأمام وإلى الخلف على مدى طول موجى وقمنا بأخذ متوسط الخرج المتغير فى موحد (مقوم) من نوع جذر متوسط المربعات، فإن $|p_{avg}|=\frac{|p_1|}{\sqrt{2}}$ و

$$D_{avg}=\frac{|p_{avg}|^2}{\rho_0 c^2}\ \ \text{watt}-\text{sec/m}^3 \qquad 2\text{-}83$$

حيث $|p_{avg}|$ مقدار قيمة ج م م ضغط الصوت المتوسطة بالنسبة للفضاء وبالنسبة للزمن. لاحظ أن المعادلة 2-83 تكون مماثلة للمعادلة 2-73.

<u>المثال 2-4</u>

أحسب كثافة الطاقة المتوسط لموجة صوتية جيبية متقدمة بحرية فى الفضاء إذا كانت أقصى إزاحة للجزيء هى 0.01 سم عند التردد 100 هيرتز.

<u>الحل</u>

من المعادلة 2-30 نجد أن ج م م السرعة هو $u_{rms}=\omega\xi_{rms}$، لهذا،

$$u_{rms}=\frac{2\pi\times100\times0.01}{\sqrt{2}\times100}=0.0445\ \ \text{m/s}$$

تعطى كثافة الطاقة المتوسطة بالمعادلة 2-75،

$$D_{avg}=(0.0445)^2\times1.18=2.34\times10^{-3}\ \ \text{watt-sec/m}^3$$

2-9 كثافة الطاقة فى موجة كروية متقدمة بحرية

يمكن بيان[5] كثافة الطاقة فى موجة كروية متقدمة بحرية تكون على الصورة،

$$D_{avg} = \frac{|p_r|^2}{\rho_0 c^2}\left(1+\frac{1}{2k^2r^2}\right) \qquad 2\text{-}84$$

حيث $|p_r|$ مقدار قيمة ج م م (بالنسبة للزمن) لضغط الصوت عند نقطة تبعد مسافة r عن مركز المصدر الكروى.

إذا كان حاصل ضرب المسافة r والتردد كبير ($2k^2r^2 >> 1$)، فإن كثافة الطاقة المتوسطة تكون كما هى فى حالة الموجة المستوية أو الموجة الموقوفة التى تنتقل بحرية، كما يمكن رؤيته من المعادلات 2-73 و 2-83.لكن بالقرب من المصدر فإن كثافة الطاقة تصبح كبيرة جداً. يحدث هذا لأن المعاوقة (أنظر المعادلة 2-64) تصبح مفاعلية أكثر وتصبح الطاقة المختزنة أكبر.

2-10 شدة – تدفق طاقة الصوت

لاحقاً فى هذا الكتاب، سنشير بشكل متكرر إلى مرجع تدفق طاقة الصوت خلال النظام الصوتى. بسبب قانون حفظ الطاقة، فإن الطاقة الكلية للصوت التى تبدأ من المصدر يجب أن تؤخذ بالكامل فى الاعتبار في النظام.

عند أى جزء من أجزاء النظام الصوتى، يجب أن نكون قادرين على حساب ومعرفة كمية الطاقة المتدفقة خلال ذلك الجزء لوحدة الزمن، كما يجب أن تكون هذه الكمية مساوية للقدرة المنبثقة من المصدر مطروح منها الفقودات المتخللة.

فى الجزء الثانى قمنا بتعريف الشدة على أنها المعدل المتوسط بالنسبة للزمن الذي عنده تتدفق الطاقة خلال وحدة المساحة فى الوسط الصوتى. فى النظام م كجم ث (mks)، تكون وحدة قياس الشدة هى الواط/م2. إن الشدة هى حاصل ضرب ضغط الصوت فى مركبة سرعة الجسيم التى تكون فى نفس الطور.

المعادلة العامة للشدة

يمكن إيجاد الشدة المتوسطة I فى اتجاه ما عند نقطة معينة فى الوسط بإنجاز العملية التالية،

$$I = \text{Re}\ p^*\, q \cos\phi \qquad 2\text{-}85$$

حيث p^* هو مرافق ج م م ضغط الصوت المركب p ، q هو ج م م سرعة الجسيم المركبة فى

الاتجاه الذي تسافر فيه الموجة، و ϕ هى الزاوية بين اتجاه سفر الموجة و الإتجاة الذي تتعين فيه الشدة. الرمز Re يشير إلى الجزء الحقيقى المأخوذ من حاصل الضرب. (القدرة المتوسطة التى يمدها المولد الكهربى للدائرة تساوى حاصل ضرب فرق الجهد فى مركبة التيار التى تكون فى طور واحد مع الجهد. يمكن بيان أن هذه القدرة تساوى $\mathrm{Re}(E^*I)$ حيث E و I هما ج م م الجهد والتيار المركبين، على وجه الترتيب.)

<u>**شدة موجة مستوية متقدمة ـ بحرية**</u>

بالنسبة لموجة الصوت المستوية المتقدمة بحرية فإن الشدة تساوى،

$$I = \mathrm{Re}\, p_+ \, e^{jkx} \frac{p_+}{\rho_o c} e^{-jkx} \cos\phi \,. \qquad 2\text{-}86$$

الطريقة الأخرى للنظر إلى سؤال شدة الموجة المستوية المتقدمة هى القول بأن كل الطاقة المحصورة فى عمود من الغاز طوله يساوى c بالمتر يجب أن تمر خلال وحدة المساحة فى ثانية واحدة. بالتالى، تكون الشدة على النحو،

$$I = c\, D_{avg} \cos\phi \qquad 2\text{-}87$$

لهذا، بغض النظر عما إذا تم تعيين الشدة من المعادلة 2-86 أو من المعادلة 2-78، نحصل على شدة الموجة المستوية المتقدمة بحرية على الصورة،

$$I = \frac{|p_+|^2}{\rho_o\, c} \cos\phi = |u_+|^2 \rho_o\, c \cos\phi \qquad 2\text{-}88$$

شدة الموجة المستوية الموقوفة.

فى الموجة المستوية الموقوفة يكون ضغط وسرعة الجسيم خارج الطور بـ 90^o فى الزمن (إرجع للمعادلات 2-76 و 2-77)، لذلك يكون الجزء الحقيقى لحاصل الضرب p^*u صفراً. لذلك، بالنسبة للموجة المستوية الموقوفة،

$$I = 0 \qquad 2\text{-}89$$

من الناحية الفيزيائية، هذا يعنى أن مقدار الطاقة الصوتية الذي يعود إلى المصدر يساوى المقدار

الذي يسافر بعيدا عنه.

شدة الموجة الكروية المتقدمة - بحرية

بالنسبة للموجة الكروية المتقدمة - بحرية نحصل على الضغط p من المعادلة 2-62. من التعريف نضع

$$p_r \equiv \frac{A_+}{r} e^{-jkr} \qquad 2\text{-}90$$

حينئذ،

$$p(r,t) = \sqrt{2}\, p_r\, e^{jwt} \qquad 2\text{-}91$$

الكمية p_r تساوى ج م م الضغط المركب عند أى نقطة تبعد مسافة r عن مركز المصدر. بالتالى، يمكن كتابة سرعة الجسيم $u(r,t)$ عند أى نقطة تبعد r على الصورة،

$$u(r,t) = \frac{\sqrt{2}\, p_r}{\rho_o c}\left(1 + \frac{1}{jkr}\right) e^{j\omega t} \qquad 2\text{-}92$$

أو ج م م سرعة الجسيم المركبة على الصورة،

$$u_r = \frac{p_r}{\rho_o c}\left(1 - j\frac{1}{kr}\right) \qquad 2\text{-}2\text{-}92$$

بالتعويض بضغط الصوت عند r و p_r والمعادلة 2-93 فى المعادلة 2-85 نحصل على،

$$I = \operatorname{Re} p_r^* \left[\frac{p_r}{\rho_o c}\left(1 - \frac{j}{kr}\right) \right] \cos\phi = \frac{|p_r|^2}{\rho_o c} \cos\phi \qquad 2\text{-}94$$

حيث، كما سبق، ϕ الزاوية بين اتجاه انتقال الموجة والاتجاه الذي تقاس فيه الشدة.

يمكن استنتاج هذه النتائج بطريقة مختلفة. تنص المعادلة 2-93 على أنه، عندما يكون kr كبير، p و u للموجة الكروية تكون تقريباً فى طور الزمن و كما يتبين من المعادلة 2-65. لذلك عندما تكون kr كبيرة، نرى من المعادلة 2-88 أنه فى حالة الموجة الكروية عند المسافات الكبيرة فإن

. $I = |u_r|^2 \rho_o c \cos\phi$

القدرة الكلية عند أى نصف قطر r تساوى $W = 4\pi r^2 I$ أى أن $W = 4\pi r^2 |p_r|^2 / \rho_o c \cos\phi$. بالتالى، بالنسبة للموجة الكروية،

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \qquad \text{for } \varphi = 0 \qquad\qquad 2\text{-}95$$

من قانون حفظ الطاقة، فإن W لا تعتمد على r إذا لم يكن هناك فقد فى الغاز لذلك تتغير الشدة عكسياً مع مربع المسافة r.

من المعادلة 2-90 نرى أن ج م م مقدار ضغط الصوت عند أى نقطة يتغير عكسياً مع مربع المسافة r . وبما أن الشدة I عند أى نقطة تتغير بشكل مماثل، فإنها تتناسب طردياً مع مربع ضغط الصوت عند تلك النقطة. هذه النتيجة تتفق مع النتيجة المبينة بالمعادلة 2-94.

المثال 2-5

مصدر صوت كروي يشع موجات جيبية فى الفضاء الحر بقدرة صوتية مقدارها 1 واط بتردد 1000 هيرتز. أحسب: (أ) شدة الموجة فى اتجاه انتقال الموجة، (ب) ضغط الغاز، (ج) سرعة الجسيم، (د) زاوية الطور بين (ب) و (ج)، (هـ) كثافة الطاقة، و (و) مستوى ضغط الصوت عند نقطة تبعد 30 سم من مركز المصدر. (افترض أن 22^o F و 0.751 mHg)

الحل

(أ) يمكن إيجاد الشدة من المعادلة 2-95.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{1}{4\pi(0.3)^2} = 0.885 \text{ watt/m}^2$$

(ب) يأتى ج م م ضغط الصوت من المعادلة 2-94.

$$|p_r| = \sqrt{I\,\rho_o c} = \sqrt{0.885 \times 407} = 18.97 \text{ newtons/m}^2$$

(ج) يعطى ج م م سرعة الجسيم بالمعادلة 2-93.

$$kr = (2\pi \times 1000/344.8)(0.3) = 5.46$$

$$|u_r| = \frac{p_r}{\rho_o c}\frac{\sqrt{1+k^2r^2}}{kr} = \frac{18.97}{407}\frac{\sqrt{1+29.8}}{5.46} = 0.0474 \text{ m/sec}$$

(د) زاوية الطور θ بين p_r و u_r توجد من المعادلة 2-64

$$\theta = 90^o - \tan^{-1} kr = 90^o - 79.6^o = 10.4^o$$

(هـ) توجد كثافة الطاقة بالمعادلة 2-84.

$$D_{avg} = \frac{|p_r|^2}{\rho_o c^2}\left(1+\frac{1}{2k^2r^2}\right) = \frac{360}{1.4\times 10^5}\left(1+\frac{1}{2\times 29.8}\right)$$
$$= 2.62\times 10^{-3} \text{ watt} - \text{sec/m}^3$$

(و) يوجد مستوى ضغط الصوت من المعادلة 1-18.

$$SPL = 20\log_{10}\frac{18.97}{2\times 10^{-5}}$$
$$= 119.5 \text{db re } 2\times 10^{-5} \text{ newtons/m}^2 \text{ (re } 2\times 10^{-4} \text{ microbar)}$$

مستوى ضغط الصوت هذا يكون 15 ديسيبل أعلى من اعلى مستوى مقاس عند 25 قدم فوق أوركسترا سيمفونى كامل. بكلمات أخرى، 1 واط للقدرة الصوتية تخلق مستوى ضغط صوتى عالى عند مسافة تبعد قدم واحد من المصدر.

مراجع هذا الباب

1- يمكن إيجاد اشتقاقات معادلة الموجة فى كتاب رايليى

Rayleigh " Vibration of Sound" Vol 2, pp. 1-15, Macmillan & Co. Ltd., London 1896; P.M. Morse" Vibration and Sound " 2nd ed., pp. 217-225, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1948; L.E. Kinsler and A.R. Frey ' Fundamentals of Acoustics ' pp. 118-137, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1950; W.B. Stephens and F. Bate, " Wave Motion and Sound' pp. 32-

43, 400-406, Edward Arnold & Co. London, 1950.

2-يوجد الاستنتاج المتجهي لمعادلة الموجة فى بحثين يجب قراءتهما معاً:

W.J. Cunningham, Application of Vector Analysis to the wave Equation, J. Acoust. Soc. Amr., 22:61 (1950); and R.V.L. Hartley on " Application of Vector Analysis to the wave Equation" Acoust. Soc. Amr., 22:511 (1950).

3- L.L Beranek, " Acoustic Measurements", p. 49, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1949.

4- M.W. Zemansky, " Heat and Thermodynamics," 2nd ed. Pp. 104-114, McGrew Hill Book Company, Inc, New York, 1943.

5- L.E. Kinsler and R. Frey, " Fundamental of Acoustic," pp. 167-169, John Wiley & Sons, Inc., 1950.

الباب الثالث

الدوائر الكهروميكانيكوصوتية

ELECTRO-MECHANO-ACOUSTICAL CIRCUITS

الجزء السادس - الدوائر الميكانيكية

1-3 مقدمة Introduction

يسمى موضوع الصوتيات الكهروميكانيكوصوتية أحياناً بالتناظرات الديناميكية. إن هذا الموضوع هو عبارة عن تطبيق نظرية الدائرة الكهربية فى حل المسائل الميكانيكية والمسائل الصوتية. فى الميكانيكا التقليدية، يتم تمثيل ظاهرة التذبذب (الإهتزاز) بالكامل بمعادلات تفاضلية. وجدت هذا الحالة أيضاً قديماً فى تاريخ التليفونات والراديو. فمع تطور الاتصال التليفونى والراديوى، أصبح واضحاً أن التمثيل التخطيطى للعناصر والتوصيل فيما بينها ذات فائدة كبيرة. مكنت هذه الرسومات التخطيطية المهندسين من تصور أداء الدائرة دون الحاجة إلى الحل المرهق لمعادلاتها. يمكن دراسة أداء أنظمة الراديو والتليفزيون من ورقة واحدة عند استعمال الرسومات التخطيطية. من الممكن أن تكون مثل هذه الدراسة صعبة وبشكل ميؤوس منه حتى لو كانت معادلات النظام متوفرة.

توجد ميزة أخرى مهمة للرسوم التخطيطية بجانب فائدتها فى تصور وفهم النظام. في أغلب الأحيان يكون لدى الشخص قطعة من جهاز يريد المعادلة التفاضلية لها. حينئذ يمكن رسم المخطط عن طريق الفحص البصري للجهاز، وبعد ذلك، يمكن تكوين المعادلات التفاضلية مباشرة من الرسوم التخطيطية. يتم تدريب معظم المهندسين على محاولة صياغة المعادلات التفاضلية مباشرة من الرسوم التخطيطية.

للرسوم التخطيطية تطبيقاتها البسيطة فى الدوائر التى تحتوي على عناصر مجمعة بشكل مدمج (مكومة)، بمعنى، عندما يكون المتغير المستقل هو الزمن فقط. فى الأنظمة الموزعة، والتى تكون شائعة فى الصوتيات، ربما يوجد ثلاثة متغيرات فى الفضاء ومتغير زمن. هنا، يصبح الرسم التخطيطى أكثر تعقيداً من تصور المعادلات التفاضلية، ويأتى الإعتراف بالنظرية الكلاسيكية مرة ثانية. لكن، توجد مسائل كثيرة فى الصوتيات، تكون العناصر كثيرة ومتزاحمة، وهنا قد يعود إستخدام الرسم التخطيطى بفائدة جيدة.

توجد أربعة متطلبات رئيسية يجب إنجازها بالطرق المستعملة في هذا النص لتأسيس الرسوم التخطيطية للأجهزة الصوتية والميكانيكية، هى:-

1-يجب أن تسمح الطرق بتأسيس الرسوم التخطيطية بالتدقيق البصري للأجهزة.

2- يجب أن تكون هذه الرسوم قادرة على المعالجة والتحريك الذي يجعل من الممكن الجمع بين العناصر السمعية والميكانيكية والكهربائية فى رسم تخطيطى واحد.

3- يجب البقاء على هوية كل عنصر في الدوائر المشتركة لكي يمكن أى شخص التعرف فى الحال على القوة، الفولطية، الكتلة، المحاثة الكهربية، وهكذا.

4 - يجب إستعمال الرموز المألوفة والقواعد فى معالجة الدوائر الكهربائية.

تم إبتكار عدة طرق تحقق متطلب واحد أو متطلبين من المتطلبات الأربعة المذكورة أعلاه، لكن لا تحقق كل المتطلبات معا. الغرض من هذا الباب هو تقديم طريقة جديدة لتناول الأنظمة الكهربية والميكانيكية والصوتية مجتمعة. أن هذه الطريقة تجمع السمات الجيدة للنظريات السابقة وتحقق المتطلبات الأربعة السابقة الذكر أيضا. تتوافق الرموز المستخدمة مع تلك الموجودة فى النصوص المتاحة [1-5] من قبل.

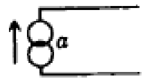
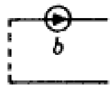
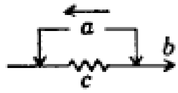
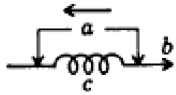
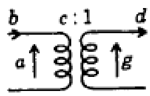
2-3 المعانى الفيزيائية والرياضية لعناصر الدوائر.

إن عناصر الدائرة التى سوف نستخدمها فى تكوين الرسم التخطيطى هى تلك العناصر المستخدمة فى نظرية الدائرة-الكهربية. تم تدوين هذه العناصر والمعنى الرياضى لها فى الجدول 3-1 ويجب تعلمها فى هذا الوقت. يوجد نوعين من المولدات. كما يوجد أربعة أنواع من عناصر الدائرة: المقاومة، المكثف، الملف الحثى، والمحول. توجد ثلاثة كميات عامة: (أ) الهبوط عبر عنصر الدائرة، (ب) التدفق خلال عنصر الدائرة، و (ج) مقدار (حجم) عنصر الدائرة. (من بين العناصر الأربعة للدائرة فإن العناصر الثلاثة الأولى تكون ثنائية الأطراف. إن هذه القائمة هى قائمة شاملة. يكون عنصر المحول رباعى الأطراف. توجد عناصر أخرى رباعية الأطراف بدون فقد مثل دائرة التدويم المثالية، (.ideal gyrator

يجب توجيه الإنتباه إلى حقيقة أن الكمية a لا تقتصر فقط على إلى الفولتية e، وكذلك لا تقتصر b على التيار الكهربي i. فى بعض المسائل، a تمثل القوة f، أو السرعة u، الضغط p، أو السرعة

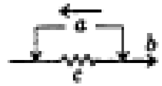
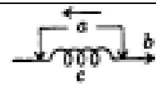
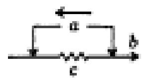
الحجمية U. فى هذه الحالات سوف تمثل الكمية b على الترتيب، السرعة u، أو القوة f ، أو السرعة الحجمية U، أو الضغط p . بالمثل، فإن الكمية c يمكن أن تكون أى كمية مناسبة مثل الكتلة، المطاوعة، المحاثة الكهربية، المقاومة، وغيرها. يعتمد المعنى الفيزيائى لعناصر الدائرة على الطريقة التى تختار بها الكميات a و b، مع التقيد بأن ab لها أبعاد قدرة فى كل الحالات. يبين الجدول 3-2 القائمة الكاملة للبدائل.

الجدول 3-1 المعانى الرياضية والفيزيائية للرموز.

الرمز	الأسم	المعنى: الحالة الإنتقالية	المعنى: الحالة الثابتة
	مولد هبوط-ثابت	لا تعتمد الكمية a على ما هو متصل بالمولد. يشير السهم إلى الطرف الموجب للمولد	
	مولد تدفق-ثابت	لا تعتمد الكمية a على ما هو متصل بالمولد. يشير السهم إلى الطرف الموجب للمولد	
	عنصر من نوع المقاومة	$a = bc$	$a = bc$
	عنصر من نوع المكثف	$a = \frac{1}{c}\int b\,dt$	$a = \frac{b}{j\omega c}$
	عنصر من نوع الحثى	$a = c\frac{db}{dt}$	$a = j\omega cb$
	عنصر من نوع المحول	$a = cg$ $cb = d$ $\frac{a}{b} = c^2\frac{g}{d}$	$a = cg$ $cb = d$ $\frac{a}{b} = c^2\frac{g}{d}$

الفكرة المهمة لتثبيت رأيك هى أن العمليات الحسابية المصاحبة لرمز ما هى عمليات ثابتة.. فعلى سبيل المثال، إذا كان العنصر من النوع الحثى فإن الهبوط عبره يساوى مشتقة الزمن للتدفق b خلاله مضروب فى حجمه c . لاحظ أن هذا القانون لا يتبع دائماً فى نظرية الدائرة – الكهربية لأنه يوجد محاثة كهربية ومقاومة تكتب فى أغلب الأحيان بدون تمييز (عشوائى) بجانب رمز العنصر من نوع-المقاومة. العمليات الثابتة التى تصاحب كل رمز تبين فى الأعمدة 3 و 4 من الجدول 3-1.

الجدول 2-3 قيم a و b و c فى الدوائر الكهربية، والميكانيكية، والصوتية.

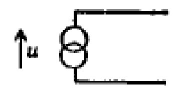
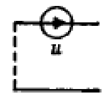
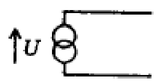
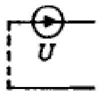
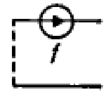
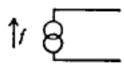
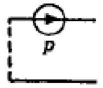
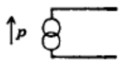
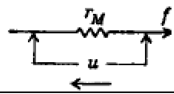
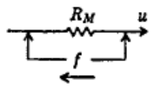
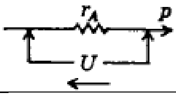
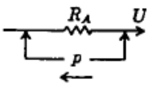
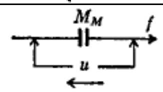
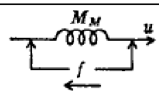
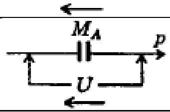
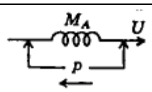
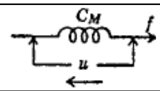
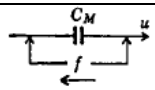
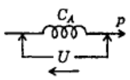
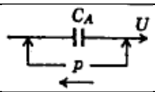
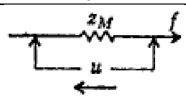
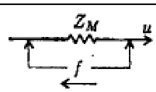
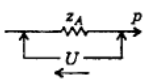
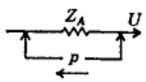
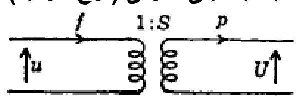
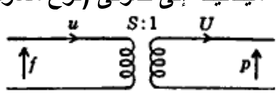
العنصر	كهربى	ميكانيكى		صوتى	
		تناظر حركية*	تناظر معاوقة	تناظر معاوقة	تناظر حركية
a	e	u	f	p	U
b	i	f	u	U	p
	$c = R_E$	$c = \frac{1}{R_M} = r_M$	$c = R_M$	$c = R_A$	$c = \frac{1}{R_A} = r_A$
	$c = C_E$	$c = M_M$	$c = C_M$	$c = C_A$	$c = M_A$
	$c = L$	$c = C_M$	$c = M_M$	$c = M_A$	$c = C_A$
	$c = z_E = \frac{e}{i}$	$c = z_M = \frac{u}{f} = \frac{1}{Z_M}$	$c = Z_M = \frac{f}{u} = \frac{1}{z_M}$	$c = Z_A = \frac{p}{U} = \frac{1}{z_A}$	$c = z_A = \frac{U}{p} = \frac{1}{Z_A}$

* التناظر المفضل

3-3 الدوائر الميكانيكية.

لا نحتاج دائما تمثيل عناصر الدائرة الميكانيكية برموز كهربية. وبما أنه كثيراً ما نرسم الدائرة الميكانيكية مباشرة بمجرد النظر من الجهاز الميكانيكى، فإن الأشكال الأكثر وضوحا للعناصر الميكانيكية تكون مفيدة أحياناً، على الأقل، حتى يتعود الطالب على الدوائر التناظرية. لذلك وبشكل متوافق، سوف نبتكر مجموعة من العناصر الميكانيكية تستخدم كتمهيد للعناصر المدونة فى الجدول 3-3.

الجدول 3-3 التحويل من تناظر النوع-المتعدد إلى تناظر نوع-المعاوقة والعكس.

العنصر	تناظر ميكانيكى		تناظر صوتى	
	نوع حركى	نوع معاوقى	نوع حركى	نوع معاوقى
مولد معاوقة ميكانيكى أو صوتي لا نهائي (حركية صفر)				
مولد معاوقة ميكانيكى أو صوتي صفرى (حركية لانهائية)				
عنصر مبدد (مقاومة أو مستجيبية)				
عنصر كتلة				
عنصر مطاوعة				
عنصر معاوقة				
عنصر محول	ميكانيكة إلى صوتى (نوع حركية) 		ميكانيكة إلى صوتى (نوع معاوقة) 	

فى الدوائر الكهربية يتم قياس الجهد بتوصيل مقياس الجهد (الفولتميتر) عبر أطراف العنصر. الجهد هو الكمية التى يمكن قياسها دون عمل كسر فى الدائرة. لكن، فى حالة قياس التيار يجب كسر الدائرة لأنه هذه الكمية تعمل (تؤثر) خلال العنصر. على الجانب الأخر، فى الأجهزة الميكانيكية، يمكننا قياس السرعة (أو الإزاحة) دون إحداث إضطراب للآلة (للجهاز) بإستخدام جهاز صغير متذبذب (ملقاط) يعمل سعوياً أو بطريقة الزخم لتعيين الكمية عند أى نقطة فى الآلة. إنها ليست السرعة بل

القوة التى تناظر التيار الكهربى. لا يمكن قياس القوة دون عمل كسر فى الجهاز (كلمة الكسر هنا تعنى فتح الدائرة عند نقطة ما وتوصيل طرفى المقياس عندها، المترجمون).

حينئذ، يصبح من الواضح أنه إذا كان العنصر الميكانيكي مماثل تماما للعنصر الكهربي فإنه يجب أن يكون له فرق فى السرعة يظهر بين (أو عبر) طرفيه وفرق قوة تعمل خلاله. أيضاً، وبشكل مماثل، يعطى حاصل ضرب ج م م القوة f بالنيوتن و ج م م مركبة السرعة التى تكون فى نفس الطور بوحدات م/ث القدرة بالواط. سوف نسمى هذا النوع من التناظر، والذي تقابل السرعة فيه جهد والقوة تقابل تيار، بتناظر من نوع- الحركية. ويعرف أيضاً بالتناظر "المعكوس".

كثير من الكتب تعلم التناظر "المباشر" بالإضافة إلى التناظر "المعكوس" . هذا التناظر هو عكس تناظر الحركية الذي فيه يتم جعل القوة تقابل الجهد والسرعة تقابل التيار. فى هذا الكتاب سوف نسمى هذا النوع من التناظر بتناظر نوع-المعاوقة. ولكي يألف الطالب كلا المفهومين، فإن كل الأمثلة المعطاه هنا سوف تكون فى تناظر نوع- الحركية ونوع-المعاوقة.

المعاوقة الميكانيكية Z_M و الحركية الميكانيكية z_M.

المعاوقة الميكانيكية هى النسبة المركبة بين القوة والسرعة عند نقطة ما فى النظام الميكانيكى. نستخدم بشكل شائع الرمز Z_M للمعاوقة الميكانيكية، حيث يدل المدلول الحرفى M على الميكانيكية. تكون الوحدات هى نيوتن-ث/م، أو أوم (ohm) ميكانيكى فى نظام م كجم ث.

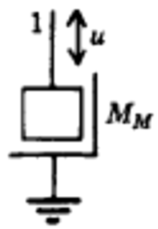
الحركية الميكانيكية هى معكوس (مقلوب) المعاوقة الميكانيكية. إنها النسبة المركبة بين السرعة والقوة عند نقطة ما فى النظام الميكانيكى. نستخدم بشكل شائع الرمز z_M للمعاوقة الميكانية، حيث يدل المدلول الحرفى M على الميكانيكية. تكون الوحدات هى متر لكل نيوتن-ث، أو مأوم (mohm) ميكانيكى فى نظام م كجم ث. (الكلمة "مأوم" تستخدم لأوم الحركية. تكون الوحدات هى متر لكل ثانية لكل نيوتن.

الكتلة M_M.

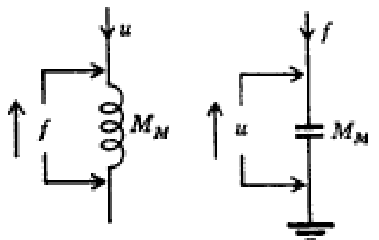
الكتلة هى الكمية الفيزيائية التى عندما تقع تحت تأثير قوة فإنها تتسارع بعجلة تتناسب طردياً مع هذه القوة. وحدة الكتلة هى الكيلوجرام. من الوهلة الأولى، تبدو الكتلة بأنها كمية لها طرف واحد لأن طرف إتصال واحد فقط يلزم لوضعها فى حالة حركة. ومع ذلك، تكون القوة التى تؤثر على الكتلة

والعجلة الناتجة محسوبة بالنسبة للأرض (أطار الزخم) حتى يكون الطرف الثانى فى الواقع هو كتلة الأرض.

يبين الشكل 3-1 الرمز الميكانيكى المستخدم فى تمثيل الكتلة. الطرف العلوى للكتلة يتحرك بسرعة u بالنسبة للأرضى. الجزء المرسوم وله الشكل ⌊___ يمثل الطرف "الثانى" للكتلة وله سرعة تساوى الصفر. يمكن قياس القوة بواسطة جهاز مناسب يزرع (يوصل على التوالى) بين النقطة 1 والعنصر التالي أو المولد المتصل بها.



الشكل 3-1 الرمز الميكانيكى للكتلة.



نوع - حركية (أ)

نوع - معاوقة (ب)

الشكل 3-2 رموز الكتلة (أ) نوع- الحركية، (ب) نوع- المعاوقة.

تخضع الكتلة M_M لقانون نيوتن الثانى، أى أن،

$$f(t) = M_M \frac{du(t)}{dt} \qquad 3\text{-}1$$

حيث $f(t)$ القوة اللحظية بالنيوتن، M_M الكتلة بالكيلوجرام، و $u(t)$ السرعة اللحظية بالمتر/ثانية.

فى الحالة الثابتة (أرجع للمعادلات 2-33 إلى 2-35)، عند تردد زاوى ω يساوى 2π قدر تردد التذبذب، نحصل على حالة خاصة لقانون نيوتن الثانى،

$$f = j\omega M_M u \qquad 3\text{-}2$$

حيث $j = \sqrt{-1}$ كما هو معتاد و f و u ج م م كميات مركبة.

يكون رمز تناظر نوع - الحركية الذي نستخدمه بدلاً من الرمز الميكانيكى فى دوائرنا مكون من نوع - المكثف. يبين الشكل 3-2أ مخطط لهذا الرمز. يمكن الحصول على العملية الرياضية الثابتة لهذا الرمز من الجدول 3-1 فى الحالة الثابتة نحصل على،

$$a = \frac{b}{j\omega c} \quad or \quad u = \frac{f}{j\omega M_M} \qquad 3\text{-}3$$

من الواضح أن هذه المعادلة تحقق القانون الفيزيائى المعطى بالمعادلة 3-2. لاحظ التماثل فى شكل الرموز الميكانيكية والتناظرية فى الأشكال 3-1 و 3-2. فى الدوائر الكهربية يكون التكامل الزمنى للتيار خلال المكثف يكون شحنةً. الكمية المناظرة هنا هى التكامل الزمنى للقوة، وهذا يكون عبارة عن زخم.

الرمز التناظرى من نوع-المعاوقة للكتلة عبارة عن محاثة كهربية. يبين الشكل 3-2ب هذا الرمز. يمكن الحصول على العملية الرياضية الثابتة لهذا الرمز من الجدول 3-1 فى الحالة الثابتة نحصل على $a = j\omega cb \; or \; f = j\omega M_M u$ ، والتى تحقق المعادلة 3-2 أيضاً. لكن، لاحظ فى هذا التناظر أنه ليس ضرورى توصيل أحد أطراف عنصر الكتلة إلى الأرضى، وهذا يؤدى فى أغلب الأحيان إلى حالة من الإرباك. فى الدوائر الكهربية يكون التكامل الزمنى للجهد عبر المحاثة الكهربية (الملف الحثى) هو لفات-الفيض. إن الكمية المناظرة هنا الزخم.

المطاوعة الميكانيكية C_M.

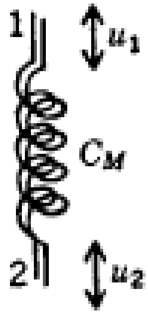
يقال أن التركيب الفيزيائى عبارة عن مطاوعة ميكانيكية C_M إذا، كانت إزاحتة عند التأثير بقوة عليه تتناسب طردياً مع هذه القوة. تكون وحدة القياس هي متر/نيوتن. عادة يكون لعنصر المطاوعة طرفين ظاهريين.

الرمز الميكانيكى المستخدم فى تمثيل المطاوعة عبارة عن زنبركي، كما هو مبين فى الشكل 3-3. يتحرك الطرف العلوى من العنصر بسرعة u_1 والطرف السفلى بسرعة u_2. يمكن قياس القوة اللازمة لتوليد فرق بين السرعات u_1 و u_2 عن طريق زرع آلة القياس عند النقطة 1 أو النقطة 2. تماماً كما سوف يقاس نفس التيار عند أى نهاية من نهايتي العنصر في الدائرة الكهربية، فإن نفس القوة ستوجد هنا عند أى نهاية من نهايات عنصر المطاوعة.

تطيع المطاوعة الميكانيكية C_M القانون الفيزيائى التالي،

$$a = \frac{1}{c}\int b\,dt \quad or \quad f(t) = \frac{1}{C_M}\int u(t)\,dt \qquad 3\text{-}4$$

حيث C_M هى المطاوعة الميكانيكية بالمتر لكل نيوتن، و $u(t)$ السرعة اللحظية بالمتر/الثانية وتساوى $u_1 - u_2$ ، الفرق فى السرعة بين الطرفين.



الشكل 3-3 الرمز الميكانيكى للمطاوعة الميكانيكية.

فى الحالة الثابتة، عند التردد الزاوي ω يساوى 2π قدر تردد التذبذب، نحصل على ،

$$f = \frac{u}{j\omega C_M} \qquad 3\text{-}5$$

حيث f و u تؤخذ كج م م كميات مركبة.

الرمز المناظر من نوع-المطاوعة المستخدم بدلا من الرمز الميكانيكية فى دوائرنا هو محاثة كهربية، كما هو مبين فى الشكل 3-4أ. العملية الرياضية الثابتة التى يمثلها هذا الرمز مدونة فى الجدول 3-1. فى الحالة الثابتة نحصل على،

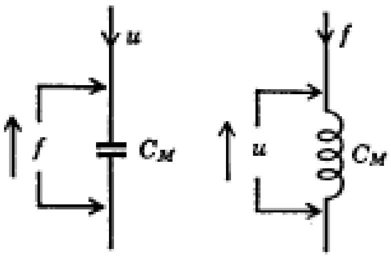
$$u = j\omega C_M f \qquad 3\text{-}6$$

فى الدوائر الكهربية يكون التكامل الزمنى للجهد عبر المحاثة الكهربية هى لفات –الفيض. الكمية المناظرة هنا هى التكامل الزمنى للسرعة والتى يكون عبارة عن إزاحة.

تحقق هذه المعادلة القانون الفيزيائى المعطى بالمعادلة 3-5. لاحظ التماثل فى شكل الرموز الميكانيكية والتناظرية فى الأشكال 3-3 و 3-4أ.

الرمز المناظر من نوع-المعاوقة للمطاوعة الميكانيكية عبارة عن مكثف ، كما هو مبين فى الشكل 3-4ب. العملية الرياضية فى الحالة الثابتة هى $a = b / j\omega c$ أو $f = u / j\omega C_M$. تحقق هذه العملية أيضاً المعادلة 3-5. فى الدوائر الكهربية، التكامل الزمنى للتيار خلال المكثف هو الشحنة.

الكمية المناظرة هنا هى الإزاحة.



الشكل 3-4 رموز المطاوعة الميكانيكية فى أنظمة من (أ) نوع- الحركية، (ب) نوع المعاوقة.

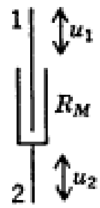
<u>المقاومة الميكانيكية R_M و المستجيبية الميكانيكية r_M</u>.

يقال أن التركيب الفيزيائى يكون مقاومة ميكانيكية R_M إذا، كانت سرعته عند التأثير عليه بقوة تتناسب طردياً مع هذه القوة. تكون وحدة القياس المقاومة الميكانيكية فى النظام م كجم ث هى الأوم الميكانيكى.

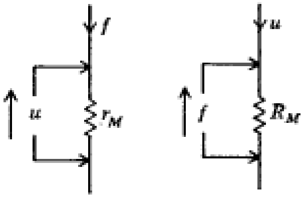
نعرف هنا أيضا الكمية r_M والتى تسمى مستجيبية ميكانيكية. تدل كلمة مستجيبية على كون الشيء يستجيب. تعرف المستجيبية الميكانيكية بأنها مقلوب المقاومة الميكانيكية R_M. تقاس المستجيبية الميكانيكية بوحدات المأوم (mohm) للنظام م كجم ث.

يقتصر التمثيل السابق للمقاومة الميكانيكية عادة على المقاومة اللزجة. تستبعد المقاومة الإحتكاكية لأنه بالنسبة لها لا تكون نسبة القوة إلى السرعة مقدار ثابت. يمكن تحديد طرفى عنصر المقاومة بمجرد النظر (بمعنى أن هذا العنصر هو عنصر ثنائى الطرف) .

العنصر الميكانيكى المستخدم لتمثيل المقاومة اللزجة هى آلة تخميد الإهتزازات السائلة (مثل مساعد السيارة، dash pot) المبينة فى الشكل 3-5. تتحرك النهاية العليا للعنصر بسرعة u_1 والنهاية السفلية بسرعة u_2. يمكن قياس القوة اللازمة لإحداث فرق بين السرعتين u_1 و u_2 عن طريق زرع آلة القياس عند النقطة 1 أو النقطة 2.



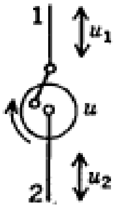
الشكل 3-5 الرمز الميكانيكى للمقاومة (اللزجة) الميكانيكية.



نوع - حركية (أ)

نوع - معاوقة (ب)

الشكل 3-6 رموز المقاومة الميكانيكية فى أنظمة من (أ) نوع- الحركية، (ب) نوع المعاوقة.



الشكل 3-7 الرمز الميكانيكى لمولد السرعة-الثابتة

تطيع المقاومة الميكانيكية R_M القانون الفيزيائى التالي،

$$f = R_M\, u = \frac{1}{r_M} u \qquad 3\text{-}7$$

حيث f القوة بالنيوتن، u هو الفرق بين السرعات u_1 و u_2 عند الطرفين، R_M المقاومة الميكانيكية بالأوم الميكانيكى، بمعنى نيوتن/(متر لكل ثانية)، و r_M المستجيبية الميكانيكية بوحدات المأوم الميكانيكى، بمعنى متر لكل ثانية لكل نيوتن.

الرمز المناظر من نوع-الحركية للرمز الميكانيكى فى دوائرنا عبارة عن مقاومة، كما هو مبين فى الشكل 3-6أ. العملية الرياضية فى الحالة الثابتة أى الذي يمثل هذا الرمز مدونة هى الجدول 3-1. فى الحالة الثابتة أو العابرة نحصل على،

$$u = r_M\ f = \frac{1}{R_M} f \qquad 3\text{-}8$$

فى الحالة الثابتة تؤخذ u و f كج م م لكميات مركبة. تحقق هذه المعادلة القانون الفيزيائى المعطى فى المعادلة 3-7.

يبين الشكل 3-6ب الرمز المناظر من نوع-المعاوقة للمقاومة الميكانيكية، كما أنه يحقق أيضاً المعادلة 3-7.

المولدات الميكانيكية.

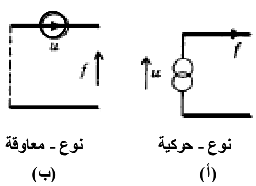
تنقسم المولدات الميكانيكية. المأخوذة فى الإعتبار إلى نوعين: مولدات ثابتة-السرعة ومولدات ثابتة-

القوة. يتم تمثيل المولد الثابت-السرعة كمحرك قوى جداً مربوط بآلية المكوك بالطريقة المبينة بالشكل 3-7. للنهايات المتقابلة للمولد سرعات u_1 و u_2. تتعين إحدى هاتين السرعتين u_1 أو u_2 بعوامل خارجية عن المولد. لكن الفرق بين السرعتين u_1 و u_2 هو السرعة u التى لا تعتمد على الحمل الخارجى المتصل بالمولد.

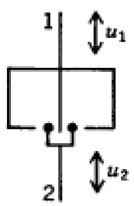
يبين الشكل 3-8 الرموز التى نستخدمها فى المتناظرات لتحل محل الرموز الميكانيكية للمولد الثابت-السرعة. العمليات الرياضية الثابتة التى تمثلها هذه الرموز مدونة فى الجدول 3-1. تشير الأسهم المبينة إلى الأطراف "الموجبة" للمولدات. الدوائر المزدوجة فى الشكل 3-8أ تدل على أن الحركية الداخلية للمولد تساوى صفر. الخط المتقطع فى الشكل 3-8ب يدل على أن المعاوقة الداخلية للمولد تساوى مالا نهاية.

هنا، يتم تمثيل <u>المولد الثابت-القوة</u> بواسطة محول طاقة كهرومغناطيسى (عبارة عن سماعة بملف متحرك) حيث فى ملفة الأبتدائى يتم الإبقاء على تيار كهربى ثابت السعة. مثل هذا المولد ينتج قوة تساوى حاصل ضرب التيار i و كثافة الفيض B والطول الفعال للسلك l الذي يقطع الفيض (أى أن، $f = Bli$) . يبين الشكل 3-9 مخطط لهذا الجهاز. للنهايات المتقابلة لهذا المولد سرعات u_1 و u_2 تتعين بعوامل موجودة خارج المولد. القوة التى ينتجها المولد، والتى يمكن قياسها بزرع جهاز القياس عند النقطة 1 أو النقطة 2، هى قوة ثابتة ولا تعتمد على ما يتصل بالمولد.

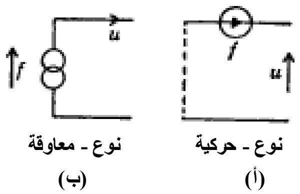
يبين الشكل 3-10 الرموز التى نستخدمها فى المتناظرات لتحل محل الرموز الميكانيكية للمولد الثابت-القوة. العمليات الرياضية الثابتة التى تمثلها هذه الرموز مدونة فى الجدول 3-1. تشير الأسهم المبينة إلى إتجاه التدفق الموجب. هنا الخط المتقطع فى الشكل 3-8 يبين أن الحركية تساوى مالا نهاية، والدوائر المزدوجة تشير ألى أن المعاوقة تساوى الصفر.



الشكل 3-8 الرموز: من (أ) نوع-الحركية، (ب) نوع- المعاوقة للمولد ثابت-السرعة.



الشكل 3-9 الرمز الميكانيكي للمولد ثابت-القوة.

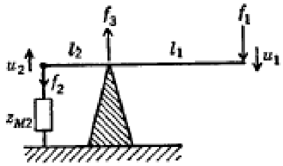


الشكل 3-10 الرموز: من (أ) نوع-الحركية، (ب) نوع- المعاوقة لأنظمة المولد ثابت-القوة.

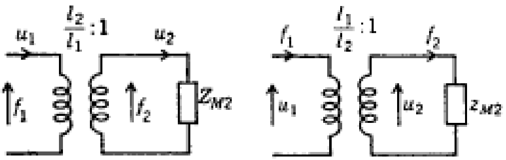
الروافع.

الرافعة البسيطة.

من الواضح أن الرافعة هى جهاز يماثل المحول. الرافعة فى أبسط صورها تتكون من قضيب عديم الوزن يرتكز على نقطة إرتكاز ثابتة (غير متحركة)، بحيث تؤدى القوة التى تؤثر على إحدى النهايات إلى أسفل إلى توليد قوة عند النهاية الأخرى إلى أعلى (الشكل 3-11).



الشكل 3-11 رافعة بسيطة.



نوع - معاوقة

(ب)

نوع - حركية

(أ)

الشكل 3-12 رموز الرافعة البسيطة (أ) من نوع-الحركية، (ب) من نوع-المعاوقة..

من مبادئ الفيزياء يمكن كتابة معادلة الإتزان للعزوم حول نقطة الإرتكاز على الصورة،

$$f_1 l_1 = f_2 l_2$$

أو، فى حالة عدم الإتزان، بفرض أن الإزاحة صغيرة يمكن كتابة،

$$u_1 l_2 = u_2 l_1 \qquad 3\text{-}9$$

أيضاً،

$$z_{M1} = \frac{u_1}{f_1} = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 z_{M2} \quad \& \quad Z_{M1} = \frac{f_1}{u_1} = \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 Z_{M2} \qquad 3\text{-}10$$

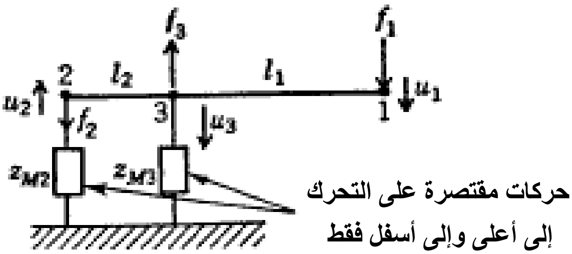
يمكن تمثيل المعادلة السابقة بمحول مثالى كالمبين فى الشكل 3-12، له نسبة تحويل $\left(\frac{l_1}{l_2}\right):1$ فى نوع الحركية و $\left(\frac{l_2}{l_1}\right):1$ فى نوع المعاوقة.

الرافعة العائمة.

كمثال لرافعة بسيطة عائمة إعتبر قضيب عديم الوزن يرتكز على نقطة إرتكاز واقعة تحت تأثير قوة (أى أن نقطة الإرتكاز متحركة). يكون القضيب موضوع بحيث أنه عند التأثير بقوة إلى أسفل على إحدى نهايتيه تتولد قوة لأعلى على النهاية الثانية. يبين الشكل 3-13 مثال لرافعة عائمة.

لحل هذا النوع من المسائل نكتب أولاً معادلات العزوم. بجمع العزوم حول مركز الدعم (الإرتكاز) نحصل على،

$$l_1\, f_1 = l_2\, f_2$$



الشكل 3-13 رافعة عائمة

وبجمع العزوم حول الإرتكاز الطرفى نحصل على،

$$(l_1 + l_2)\, f_1 = l_2\, f_3 \qquad 3\text{-}11$$

عندما تكون القوى فى حالة عدم إتزان، وإذا إفترضنا إزاحات متناهية الصغير، فإن السرعات ترتبط بالقوى من خلال الحركيات، بحيث

$$u_3 = z_{M3}\, f_3 = z_{M3} \frac{l_1 + l_2}{l_2} f_1$$

$$u_2 = z_{M2}\, f_2 = z_{M2} \frac{l_1}{l_2} f_1 \qquad 3\text{-}12$$

أيضاً، بالجمع أو التراكب، من الهندسة البسيطة نرى أن،

$$u_1^{'} = u_3 \frac{l_1 + l_2}{l_2} \qquad \text{for} \qquad u_2 = 0$$

$$u_1'' = u_2 \frac{l_1}{l_2} \qquad \text{for} \qquad u_3 = 0$$

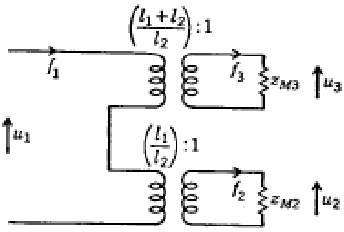
بالتالي،

$$u_1 = u_1' + u_1'' = \frac{l_1 + l_2}{l_2} u_3 + \frac{l_1}{l_2} u_2 \qquad 3\text{-}13$$

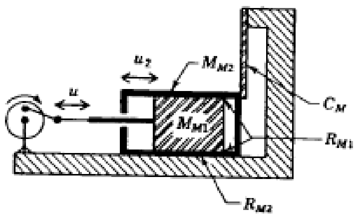
وفى النهاية نحصل على،

$$\frac{u_1}{f_1} = z_{M1} = z_{M3}\left(\frac{l_1 + l_2}{l_2}\right)^2 + z_{M2}\left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 \qquad 3\text{-}14$$

يمكن تمثيل هذه المعادلة بالدائرة التناظرية المبينة بالشكل 3-14. تحمل الرافعة المولد بحركيتين متصلتين على التوالى، تتصرف كل منهما كرافعة بسيطة عندما تكون الأخرى مساوية للصفر. سوف نرى أن هذه هى طريقة الحصول على مكافئ لكتلتين على التوالى بدون نقطة سرعة-صفرية مشتركة (أرضى). سوف يتضح هذا المفهوم فى المثال 3-3.



الشكل 3-14 رمز لرافعة عائمة من نوع-الحركية.



الشكل 3-15 جهاز ميكانيكى من ستة عناصر.

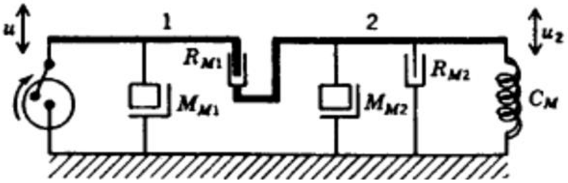
المثال 3-1

يتكون الجهاز الميكانيكى المبين فى الشكل 3-15 من مكبس ذى كتلة M_{M1} ينزلق فوق سطح زيتى داخل أسطوانة كتلتها M_{M2}. هذه الإسطوانة تنزلق بدورها على أخدود مزيت مقطوع في جسم صلب. تكون مقاومات الإنزلاق (اللزجة) R_{M1} و R_{M2} على الترتيب. تم تثبيت الإسطوانة بواسطة زنبركى له مطاوعة C_M. يظل المولد الميكانيكى عند سرعة جيبية ثابتة، لها تردد زاوى ω، لها ج م م يساوى u م/ث. أوجد القوة الناتجة بواسطة المولد؟

الحل

بالرغم من أن القوة سوف تتعين فى النهاية من تحليل الدائرة التناظرية من نوع الحركية لهذا الجهاز الميكانيكى، إلا أنه كثيراً ما يكون مفيداً رسم مخطط الدائرة –الميكانيكية. ستكون هذه الخطوة المؤقتة إلى الدائرة المطلوبة مساعدة خصوصا بالنسبة للطالب المدرب علي إستعمال التناظرات. كما أن إستعمال هذه الخطوة يزيل الأخطاء العملية من الدائرة النهائية.

لرسم الدائرة الميكانيكية، لاحظ أولاً نقط الإتصال للعنصرين أو ما يزيد. هذه الطريقة تحدد كل أطراف العناصر التى تتحرك بنفس السرعة. فى هذا المثال توجد سرعتين هما u و u_2 بالإضافة إلى الأرضى (أو السرعة الصفرية). تم تمثيل هاتين السرعتين فى مخطط الدائرة الميكانيكية بسرعات القضيبين الصلبين التخيليين، 1 و 2 فى الشكل 3-16، والذين يتذبذبان فى إتجاه أفقى. تم رسم الدائرة بواسطة توصيل كل أطراف العنصر التى لها السرعة u إلى القضيب الأول وكل الأطراف التى لها السرعة u_2 إلى القضيب الثانى. تم رسم كل الأطراف التى لها السرعة صفر متصلة بالقضيب الأرضى. لاحظ أن الكتلة دائما لها طرف واحد متصل بالأرضى (يستثنى من هذه القاعدة عندما تجسد الأداة الميكانيكية رافعة واحدة أو أكثر من الروافع العائمة، كما تعلّمنا فيما سبق فى هذا الباب). ثلاثة عناصر من الموجودة فى الشكل 3-15 لها طرف واحد عند السرعة u هما: المولد، الكتلة M_{M1} و المقاومة اللزجة R_{M1}، وتتصل هذه الأطراف إلى القضيب 1. كما توجد أربعة عناصر لها طرف واحد عند السرعة u_1 هما: المقاومات اللزجة R_{M1} و R_{M2}، و الكتلة M_{M2} و المطاوعة C_M، وتتصل هذه الأطراف جميعاً إلى القضيب 1. توجد خمسة عناصر لها طرف واحد عند السرعة الصفرية هما: المولد والكتلتين، والمقاومات اللزجة R_{M2}، و المطاوعة C_M، وتتصل جميعً هذه الأطراف إلى الأرضى.



الشكل 3-16 الدائرة الميكانيكية للجهاز المبين فى الشكل 3-15.

نحن الآن فى وضع تحويل الدائرة الميكانيكية إلى دائرة تناظرية من نوع-الحركية. يمكن تنفيذ ذلك ببساطة بإستبدال العناصر الميكانيكية بالعناصر المتناظرة من نوع-الحركية. تصبح الدائرة كما هو

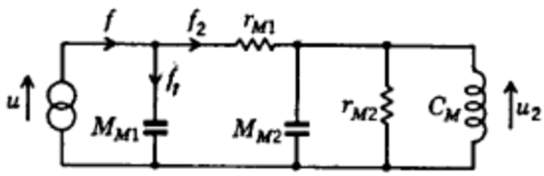
مبين بالشكل 3-17. تذكر أن، فى التناظر من نوع الحركية، "تتدفق" القوة خلال العناصر والسرعة تكون عبارة عن الهبوط عبرها. يجب أن تكتب المقاومات فى الحالة المنخفضة (بأحرف صغيرة r لتنظيرها. وكما تم تعريفه من قبل، فإن $r_M = 1/R_M$ وأن الوحدات هى المأوم (mohm) الميكانيكى للنظام م كجم ث.

يمكن إيجاد معادلات هذه الدائرة بالأسلوب المعتاد، بإستخدام القواعد المدونة فى الجدول 3-1. دعنا نعين $z_M = u/f$ ، وهى الحركية الميكانيكية التى تمثل المولد. الحركية الميكانيكية للعناصر الثلاثة المتوازية الموجودة على الجانب الأيمن من الرسم التخطيطى هى،

$$\frac{u_2}{f_2} = \frac{1}{\dfrac{1}{1/j\omega M_{M2}} + \dfrac{1}{r_{M2}} + \dfrac{1}{j\omega C_M}} = \frac{1}{j\omega M_{M2} + R_{M2} + \dfrac{1}{j\omega C_M}}$$

بتضمين العنصر r_{M1} فإن الحركية الميكانيكية لجزء الدائرة الذي يتدفق خلاله f_2 حينئذا تكون

$$\frac{u}{f_2} = r_{M1} + \frac{1}{j\omega M_{M2} + R_{M2} + \dfrac{1}{j\omega C_M}}$$



الشكل 3-17 الدائرة التناظرية من نوع-الحركية للجهاز المبين فى الشكل 3-15.

لاحظ أن الحركية الميكانيكية للدخل z_M تعطى بالعلاقة،

$$z_M = \frac{u}{f} = \frac{u}{f_1 + f_2}$$

و

$$f_1 = \frac{u}{1/j\omega M_{M1}} = j\omega M_{M1} u$$

بالتعويض بـ f_1 و f_2 فى المعادلة الثانية نحصل على حركية الدخل على الصورة،

$$z_M = \frac{u}{f} = \frac{1}{j\omega M_{M1} + \cfrac{1}{r_{M1} + \cfrac{1}{j\omega M_{M2} + R_{M2} + \cfrac{1}{j\omega C_M}}}} \qquad \text{3-15أ}$$

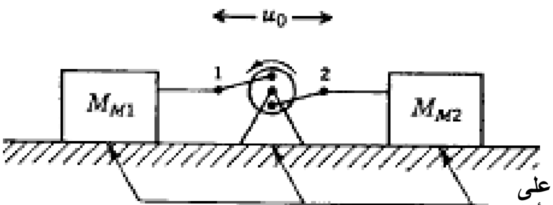
المعاوقة الميكانيكية مقلوب المعادلة 3-15أ، بالتالي،

$$Z_M = \frac{f}{u} = j\omega M_{M1} + \cfrac{1}{r_{M1} + \cfrac{1}{j\omega M_{M2} + R_{M2} + \cfrac{1}{j\omega C_M}}} \qquad \text{3-15ب}$$

$$f = Z_M u \quad \text{newtons} \qquad \text{3-16}$$

المثال 3-2

كمثال أخر على الدائرة الميكانيكية، دعنا نفترض الكتلتين 2 كجم و 4 كجم كما فى الشكل 3-18. تم إفتراض أن الكتلتين ترتكزان على سطح مستوى أملس ومتصلتين معاً من خلال مولد سرعة – ثابتة يكون حر الإنزلاق على السطح المستوى الأملس. بفرض أن السرعة $u_o = 2\cos 1000t$ cm/sec. ارسم الدائرة التناظرية من نوع – الحركية، وعين القوة f المتولدة بواسطة المولد. أيضاً، عين الحركية الممثلة للمولد.



الشكل 3-18 جهاز ميكانيكى ثلاثى العناصر.

الحل

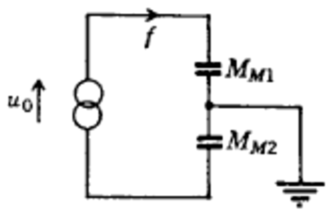
ليس للكتل نفس السرعة بالنسبة للأرضى. الفرق بين سرعات الكتلتين هو u_o. العنصر الذي يمثل الكتلة مبين فى الشكل 3-2أ مع نهاية واحدة متصلة بالأرضى والنهاية الأخرى متحركة بسرعة الكتلة.

الدائرة من نوع الحركية لهذا المثال تبين فى الشكل 3-19. السرعة u_o تساوى u_1+u_2، حيث u_1 سرعة M_{M1} بالنسبة للأرضى و u_2 سرعة M_{M2} بالنسبة للأرضى. تكون القوة هى،

$$\begin{aligned} f_{rms} &= \frac{(u_o)_{rms}}{(1/j\omega M_{M1})+(1/j\omega M_{M2})} \\ &= \frac{j\omega\, M_{M1}M_{M2}}{M_{M1}+M_{M2}}\,u_o \qquad\qquad 3\text{-}17 \\ &= \frac{j1000\times2\times4\times0.02}{(2+4)\sqrt{2}} = j18.9 \ \text{ newtons} \end{aligned}$$

الرمز j يبين أن الطور الزمنى للقوة يكون خارج الطور مع سرعة المولد بـ 90 درجة.

من الواضح أنه، عندما تكون إحدى الكتل كبيرة مقارنة مع الكتلة الأخى، تكون القوة هى تلك القوة اللازمة لتحريك الكتلة الأصغر منفردة. يوضح هذا المثال النوع الوحيد للحالة التى فيها يمكن أن تكون الكتل فى توالى دون إدخال الروافع العائمة. كما فى أغلب الحالات، يمكن لكتلتين فقط أن تكونا فى توالى لأن الأرضى المشترك يكون ضرورياً.



الشكل 3-19 الدائرة التناظرية من نوع- الحركية للدائرة المبينة فى الشكل 3-18.

تكون الحركية الممثلة للمولد هى،

$$\begin{aligned} z_M &= \left(\frac{u_o}{f}\right)_{rms} = \frac{M_{M1}+M_{M2}}{j\omega M_{M1}M_{M2}} \qquad\qquad 3\text{-}18 \\ &= \frac{6}{j1000\times8} = -j7.5\times10^{-4} \quad \text{mohms} \end{aligned}$$

المثال 3-3

يبين الشكل 3-20 مثال لجهاز ميكانيكى يتضمن رافعة عائمة. يمكن إعتبار الكتل المتصلة بالنقط 2

و 3 مرتكزة على زنبركيات مطاوعة جداً. بفرض أن القوة الدافعة f_1 سوف يكون لها تردد أعلى من ترددات رنين الكتل بشكل كافى و أن زنبركياتها تساند بحيث ،

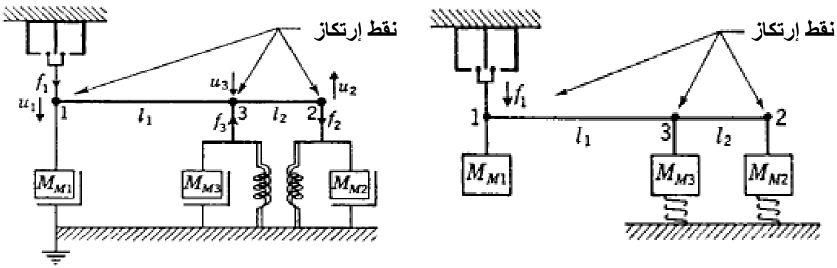
$$z_{M2} \approx \frac{1}{j\omega M_{M2}}$$

$$z_{M3} \approx \frac{1}{j\omega M_{M3}}$$

وأيضاً تأكد أن الكتل متصلة بقضيب رافعة عديم الوزن عند النقطة 1، بحركية تساوى،

$$z_{M1} = \frac{1}{j\omega M_{M1}}.$$

أوجد الحركية الكلية الممثلة للمولد ثابت-القوة f_1 .



الشكل 3-20 (أ) جهاز ميكانيكى يتضمن رافعة عائمة. (ب) المخطط الميكانيكى للشكل (أ). تكون مطاوعة الزنبركيات كبيرة جدا حتى تستطيع كل من f_1 و f_2 تحريك M_{M2} و M_{M3}.

الحل

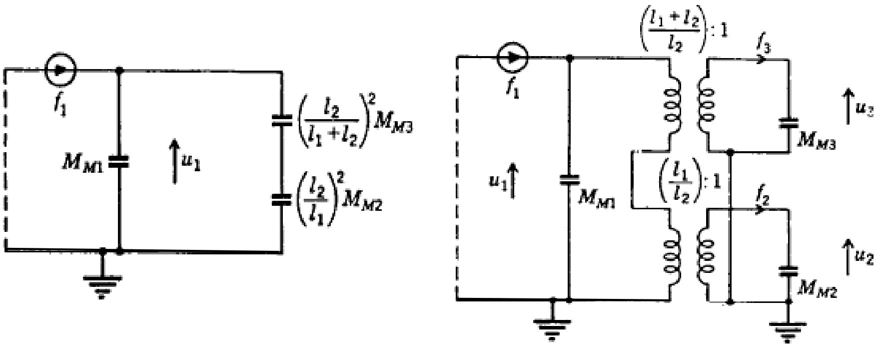
بالفحص، يمكن رسم الدائرة المناظرة من نوع-الحركية كما هو مبين بالأشكال 3-21أ و 3-21ب.

بالحل بالنسبة لـ $z_M = u_1 / f_1$ نحصل على،

$$z_M = \frac{1}{j\omega\left[\dfrac{M_{M1}M_{M2}l_2^2}{M_{M3}l_1^2 + M_{M2}(l_1+l_2)^2} + M_{M1}\right]} \qquad 3\text{-}19$$

لاحظ أن إذا $l_2 \to 0$ ، فإن الحركية تكون ببساطة للكتلة M_{M1} . وأيضاً، إذا $l_1 \to 0$ ، فإن الحركية تكون للكتلة M_{M1} و M_{M3} ، بمعنى أن،

$$z_M = \frac{1}{j\omega(M_{M3} + M_{M1})} \qquad 3\text{-}20$$



(ب) (أ)

الشكل 3-21 (أ) الدائرة المناظرة من نوع- الحركية للجهاز الميكانيكى المبين فى الشكل 3-20. (ب) مثل الشكل (أ) لكن تم إزالة المحولات.

من الممكن أنه فى حالة رافعة عائمة واحدة أو أكثر فإنه يجب أن يكون لها كتلة واحدة أو أكثر ليس لها طرف متصل بالأرضى.

الجزء السابع - الدوائر الصوتية

3-4 العناصر الصوتية

كثيراً ما تكون الدوائر الصوتية أكثر صعوبة من الدوائر الميكانيكية لأن العناصر تكون أقل سهولة فى التعرف. كما كان فى حالة الدوائر الميكانيكية، فإن الأشكال الأكثر وضوحاً للعناصر تكون مفيدة كمرحلة متوسطة عند رسم مخطط الدائرة المناظرة. عندما يكون الطالب أكثر ألفة مع الدوائر الصوتية، فإنه سيكون قادر على المرور مباشرة من الجهاز الصوتى إلى الشكل النهائى للدائرة المكافئة.

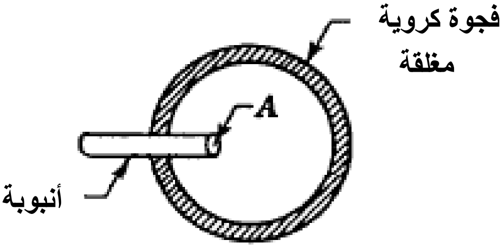
فى الأجهزة الصوتية، تكون الكمية التى نستطيع قياسها بسهولة بدون تعديل الجهاز هى ضغط الصوت. يتم إجراء هذه القياسة عن طريق إدخال أنبوبة مجس مجوفه صغيرة إلى مجال الصوت عند النقطة المطلوبة. تؤدى أنبوبة المجس هذه إلى أحد جوانب غشاء ميكروفون، بينما يتم تعريض الجانب الأخر للغشاء إلى الضغط الجوى. تحدث حركة الغشاء عند وجود فرق فى الضغط عبره. يكون الفرق بين الضغط الجوى وضغط مجال الصوت هو ضغط الصوت p .

وبما أننا نستطيع قياس ضغط الصوت بواسطة مجس الأنبوبة هذا دون عمل إزعاج للجهاز، فإنه يبدو أن ضغط الصوت يكون مناظر للجهد فى الدوائر الكهربية. يتطلب هذا الإختيار منا أن نعتبر أن التيار يكون مناظراً لكمية ما تتناسب مع السرعة. وكما سنبين بإختصار، يكون الإختيار الجيد لمناظر التيار هو السرعة الحجمية، والتى تكون عبارة عن إزاحة حجم الغاز لكل ثانية.

يمكن البرهنة بقوة على جودة هذا الإختيار عندما نأخذ فى الإعتبار العلاقات التى تحكم تدفق الهواء داخل الأجهزة الصوتية مثل السماعات، الميكروفونات، ومرشحات الضوضاء. داخل نوع معين من الميكروفونات، مثلاً، توجد فجوة هواء تتصل إلى الهواء الخارجى من خلال أنبوبة صغيرة (أرجع للشكل 3-22). الأن، إفترض أنه تم وضع النهاية الخارجية لهذه الأنبوبة فى موجة صوتية. سوف تسبب الموجة حركة جزيئات الهواء فى الأنبوبة. من الواضح، وجود إتصال بين الأنبوبة والفجوة عند الطرف الداخلى للأنبوبة عند النقطة A . دعنا نطرح على أنفسنا السؤال التالي، ما هى الكميات الفيزيائية التى تكون متصلة عند نقطة الإتصال هذه؟

أولاً، يكون ضغط الصوت الموجود داخل الأنبوبة عند A مثل الموجود فى الفجوة بالكاد خارج A . بمعنى أن لدينا إتصال فى ضغط الصوت. ثانياً، تكون كمية الهواء التى تترك النهاية الداخلية

للأنبوبة الصغيرة فى فترة زمنية ما مثل الكمية التى تدخل الفجوة فى نفس الفترة الزمنية. بمعنى أن كتلة الغاز التى تغادر الأنبوبة الصغيرة لكل ثانية تساوى الكتلة التى تدخل الحجم لكل ثانية. وحيث أن الضغط كما هو عند كلا الموضعين، فإن كثافة الغاز يجب أن تكون كما هى أيضاً، ويترتب على ذلك أنه يوجد إتصال فى السرعة الحجمية ($م^3$/ث) عند نقطة الإتصال هذه. بشكل مماثل، فى حالة الكهرباء، يوجد إتصال للتيار الكهربى عند الوصلة (نقطة الإتصال). يجب أن يوجد إتصال للسرعة الحجمية حتى فى حالة وجود عدة أنابيب أو فجوات متصلة بالقرب من نقطة واحدة. فيما عدا ذلك يحدث إنتهاك لقانون حفظ الكتلة.



الشكل 3-22 فجوة مغلقة متصلة مع الهواء الخارجى بواسطة أنبوبة مساحة مقطعها S . يحدث مستوى الإتصال بين الأنبوبة والفجوة عند النقطة A .

نستنتج أن الكمية التى تتدفق خلال العناصر الصوتية التى إعتبرناها يجب أن تكون سرعة حجمية U (بوحدات $م^3$ /ث) ويجب أن يكون الهبوط عبر هذه العناصر الصوتية هو ضغط p (بوحدات نيوتن/$م^2$). يبين هذا الإستنتاج أن التناظر من نوع-المعاوقة يكون هو التناظر المفضل للدوائر الصوتية. حاصل ضرب ضغط الصوت الفعال فى مركبة السرعة الحجمية الفعالة التى تكون فى نفس الطور U يعطى القدرة الصوتية بالواط.

فى هذا الجزء، سنناقش السمات الأكثر عمومية للدوائر الصوتية. فى الباب الخامس من هذا الكتاب، سنشرح بشكل كامل التقريبات المشتملة وقواعد إستخدام المفاهيم المذكورة هنا فى المسائل العملية.

الكتلة الصوتية M_A :

الكتلة الصوتية هى كمية تتناسب مع الكتلة لكن لها الأبعاد كجم/$م^4$. تصاحب هذه الكمية كتلة الهواء المعجلة بواسطة محصلة قوة تعمل على إزاحة الغاز دون عمل إنضغاط ملموس له. إن مفهوم التعجيل دون حدوث إنضغاط هو مفهوم جدير بالتذكر. سوف يساعدك هذا المفهوم فى تمييز الكتل الصوتية عن عناصر أخرى.

العنصر الصوتى المستخدم لتمثيل الكتلة الصوتية هو عبارة عن أنبوبة مملوءة بغاز كالمبينة بالشكل 23-3.



الشكل 23-3 أنبوبة لها طول l **ومساحة مقطع** S.

القانون الفيزيائى الذي يحكم حركة الكتلة التى تتأثر بقوة هو قانون نيوتن الثانى، $f(t) = M_M du(t)/dt$. يمكن التعبير عن هذا القانون بدلالة الحدود الصوتية كما يلى،

$$\frac{f(t)}{S} = \frac{M_M}{S}\frac{d[u(t)S]}{dt\,S} = p(t) = \frac{M_M}{S^2}\frac{dU(t)}{dt}$$

أو

$$p(t) = M_A \frac{dU(t)}{dt} \qquad 3\text{-}21$$

حيث $p(t)$ = الفرق اللحظى بين الضغوط (بالنيوتن/م^2) الموجود عند كل نهاية لكتلة الغاز M_M كجم الموجودة تحت تأثير التعجيل.

$M_A = M_M / S^2$ = الكتلة الصوتية (كجم/م^4) للغاز تحت التعجيل. هذه الكمية تساوى تقريباً كتلة الغاز داخل أنبوبة المحتوى مقسومة على مربع مساحة المقطع. ولكى نكون أكثر دقة، يجب أن نلاحظ أن الغاز الموجود فى الجوار المباشر لنهايات الأنبوبة يجب أن يضاف أيضاً للكتلة. لذلك، توجد "تصحيحات نهايات" يجب أن تؤخذ فى الإعتبار. تم مناقشة هذه التصحيحات فى الباب الخامس.

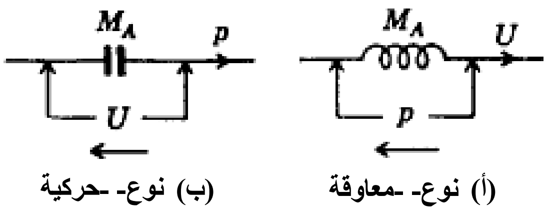
$U(t)$= السرعة الحجمية اللحظية للغاز (م^3/ث) عبر مستوى مساحة المقطع فى الأنبوبة. السرعة الحجمية $U(t)$ تساوى السرعة الخطية $u(t)$ مضروبة فى مساحة المقطع S.

فى الحالة المستقرة، ومع تردد زاوى ω نحصل على،

$$p = j\omega M_A U \qquad 3\text{-}22$$

حيث p و U هى ج م م الكميات المركبة.

الرمز التناظرى من نوع-المعاوقة للكتلة الصوتية كما هو مبين بالشكل 3-24أ، ومن نوع الحركية فى الشكل 3-24ب. فى الحالة الثابتة، بالنسبة لأى منهما نحصل على المعادلة 3-22. تشير الأسهم إلى الإتجاه الموجب للتدفق أو إلى الهبوط الموجب.

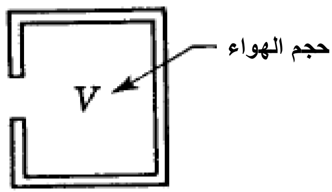


الشكل 3-24 رموز الكتلة الصوتية (أ) نوع-المعاوقة، (ب) نوع الحركية.

المطاوعة الصوتية C_A :

المطاوعة الصوتية هى كمية ثابتة لها أبعاد م^5/نيوتن، وتصاحب حجم الهواء الذي يكون مضغوط بمحصلة قوة بدون حدوث متوسط إزاحة لمركز ثقل الهواء فى الحجم. بكلمات أخرى، الإنضغاط بدون تعجيل هو الذي يميز المطاوعة الصوتية.

العنصر الصوتى الذي يستخدم لتمثيل المطاوعة الصوتية هو حجم الهواء المرسوم كما فى الشكل 3-25.



الشكل 3-25 حجم محصور من الهواء V مع فتحة لدخول تغيرات الضغط.

القانون الفيزيائى الذي يحكم إنضغاط حجم من الهواء يتأثر بمحصلة قوة يكون على الصورة $f(t) = (1/C_M)\int u(t)\,dt$. بالتحويل من الشكل الميكانيكى إلى الشكل الصوتى نحصل على،

$$\frac{f(t)}{S} = \frac{1}{C_M\,S}\int u(t)\frac{S}{S}\,dt \qquad \text{or}$$

$$p(t) = \frac{1}{C_M\,S^2}\int U(t)\,dt \qquad \text{or}$$

$$p(t) = \frac{1}{C_A}\int U(t)\,dt \qquad 3\text{-}23$$

حيث $p(t)$ = الضغط اللحظى (نيوتن/م2) الذي يؤثر لإنضغاط الحجم V من الهواء.

$C_A = C_M S^2 =$ المطاوعة الصوتية (م[5]/نيوتن) لحجم الهواء الواقع تحت تأثير الإنضغاط. المطاوعة الصوتية تساوى تقريباً حجم الهواء مقسوم على γP_o، كما سنرى فى الباب الخامس.

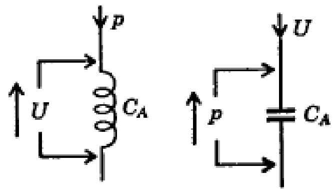
$U(t) =$ السرعة الحجمية اللحظية (م[3]/ث) للهواء المتدفق إلى الحجم الذي يكون تحت تأثير إنضغاط. السرعة الحجمية $U(t)$ تساوى السرعة الخطية $u(t)$ مضروبة بمساحة المقطع S.

فى الحالة الثابتة، مع تردد زاوى ω نحصل على،

$$p = \frac{U}{J\omega C_A} \qquad 3\text{-}24$$

حيث p و U جذر متوسط كميات مركبة.

يكون العنصر التناظرى من نوع-المعاوقة للمطاوعة الصوتية كما هو مبين فى الشكل 3-26أ وفى نوع- الحركية كما بالشكل 3-26ب. فى الحالة الثابتة تنطبق المعادلة 3-24 على أى منهما.



الشكل 3-26 رموز المطاوعة الصوتية (أ) نوع-المعاوقة، (ب) نوع-الحركية.

المقاومة الصوتية R_A ، و المستجيبية الصوتية r_A.

تكون المقاومة الصوتية R_A مصحوبة بفقد تبديدى يحدث عندما توجد حركة لزجة لكمية من غاز خلال ساتر (شاشة) ذى شبكة – رفيعة أو خلال أنبوبة شعرية. أنها كمية ثابتة لها وحدات نيوتن-ث/م[5]. تكون الوحدة فى النظام م كجم ث هى الأوم الصوتى. العنصر الصوتى المستخدم لتمثيل المقاومة الصوتية هو ساتر ذى شبكة – رفيعة كالمرسومة فى الشكل 3-27.



الشكل 3-27 ساتر ذى شكبة –رفيعة تعمل كرمز صوتى للمقاومة الصوتية.

مقلوب المقاومة الصوتية هى المستجيبية الصوتية r_A . وحدة المستجيبية الصوتية هى المأوم الصوتى (mohm) فى النظام م كجم ث، وأبعادها هو م^5/ث -نيوتن.

القانون الفيزيائى الذي يحكم التأثيرات التبددية للنظام الميكانيكى يعطى بالعلاقة $f(t) = R_M\, u(t)$ أو بدلالة الكميات الصوتية بالعلاقة،

$$p(t) = R_A U(t) = \frac{1}{r_A} U(t) \qquad 3\text{-}25$$

حيث $p(t)$ = الفرق بين الضغوط اللحظية (نيوتن/م2) عبر العنصر المبدد فى الحالة الثابتة p ج م م الكمية المركبة.

$R_A = R_M / S^2 =$ المقاومة الصوتية بالأوم الصوتى، بمعنى نيوتن-ث/م^5.

$r_A = r_M S^2 =$ المستجيبية الصوتية بالمأوم الصوتى، بمعنى م5/نيوتن-ث.

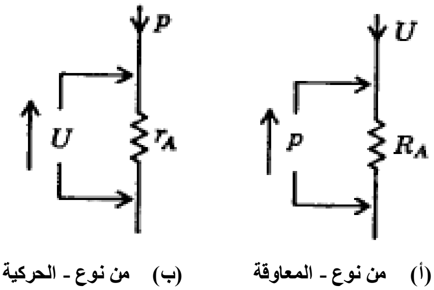
$U(t) =$ السرعة الحجمية اللحظية (م^3/ث) للغاز خلال مساحة مقطع المقاومة. فى الحالة الثابتة تقاس U بج م م الكمية.

الرمز التناظري من نوع - المعاوقة للمقاومة الصوتية يكون كما هو مبين بالشكل 3-28أ ومن نوع – الحركية كما بالشكل 3-28ب.

المولدات الصوتية.

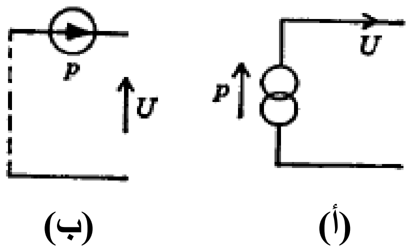
المولدات الصوتية يمكن أن تكون إما من نوع السرعة الحجمية -الثابتة أو من النوع الضغط - الثابت. ستكون المحركات الأساسية فى دوائرنا الصوتية تماما كما هو مبين فى الأشكال 3-7 و 3-9 ما عدا

أن u_2 غالباً ستكون صفر و u_1 سوف تكون سرعة مكبس صغير له مساحة مقطع S. بتذكر $u = u_1 - u_2$، نرى أن المولد فى الشكل 3-7 من نوع السرعة الحجمية - الثابتة $U = uS$، وأن الموجود فى الشكل 3-9 من النوع ذات الضغط-الثابت $p = f / S$.



الشكل 3-28 (أ) رمز المقاومة الصوتية من نوع – المعاوقة، (ب) رمز المستجيبية الصوتية من نوع – الحركية.

الرموز التناظرية لكلا النوعين من المولدات الصوتية تكون كما هى مبينة فى الشكلين 3-29 و 3-30. تشير الأسهم إلى إتجاه الطرف الموجب أو إلى التدفق الموجب. وكما سبق، تدل الدوائر المزدوجة على معاوقة أو حركية صفرية والخط المتقطع يدل على معاوقة أو حركية لا نهائية.



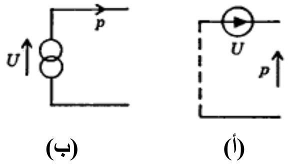
الشكل 3-29 رموز مولدات الضغط - الثابت من (أ) نوع- المعاوقة، (ب) نوع – الحركية.

الأنظمة الدورانية الميكانيكية.

يتم تناول الأنظمة الدورانية الميكانيكية بنفس الأسلوب الذي تناولنا به الأنظمة المستقيمة المتعامدة الميكانيكية. فيما يلى نقدم قائمة بالكميات المتناظرة فى النظامين.

الأنظمة المتعامدة		الأنظمة الدورانية	
$= f$	القوة بالنيوتن	$= T$	عزم اللى، نيوتن-متر
$= v$	السرعة، م/ث	$= \theta$	السرعة الزاوية، قطرى/ث
$= ع$	الإزاحة الخطية، م	$= \phi$	الإزاحة الزاوية، قطرى
$= Z_M$	المعاوقة الميكانيكية، أوم $= f / v$	$= Z_R$	المعاوقة الدورانية، أوم دورانى $= T / \theta$

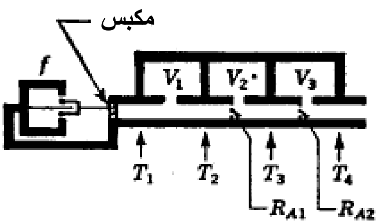
	ميكانيكى فى م كجم ث		فى م كجم ث
$= z_M$	$v/f =$ الحركية الميكانيكية، مأوم (mohm) ميكانيكى فى م كجم ث	$= z_R$	$\theta/T =$ الحركية الدورانية، مأوم (mohm) دورانى فى م كجم ث
$= R_M$	المقاومة الميكانيكية، أوم ميكانيكى فى م كجم ث	$= R_R$	المقاومة الدورانية، أوم دورانى فى م كجم ث
$= r_M$	المستجيبية الميكانيكية، ، مأوم (mohm) ميكانيكى فى م كجم ث	$= r_R$	المستجيبية الدورانية ، ، مأوم (mohm) دورانى فى م كجم ث
$= M_M$	الكتلة، كجم	$= I_R$	عزم القصور الذاتي، كجم-م^2
$= C_M$	المطاوعة الميكانية، م/نيوتن	$= C_R$	المطاوعة الدورانية، قطرى/نيوتن=م
$= W_M$	القدرة الميكانيكية، واط	$= W_R$	القدرة الدورانية ، واط



الشكل 3-30 رموز مولد السرعة الحجمية - الثابتة من (أ) نوع- المعاوقة، (ب) نوع – الحركية.

المثال 3-4

يتكون الجهاز المبين فى الشكل 3-31 من ثلاث فجوات V_1 ، V_2 ، و V_3 ، ساترين ذى شبكات رفيعة R_{A1} و R_{A2} ، وأربعة أنابيب قصيرة T_1 ، T_2 ، T_3 ، و T_4 و مولد ثابت-الضغط. ولأن الهواء فى الأنابيب ليس محصور (محبوس) ، فإنه يخضع لانضغاط مهمل. ولأن الهواء فى الفجوات محصور فإنه يخضع لحركة متوسطة صغيرة. بفرض أن قوة المولد هى $f = 10^{-5}\cos 1000t$ نيوتن، نصف قطر الأنبوبة $a = 0.5$ cm ، طول كل أنبوبة $l = 5$ cm ، حجم كل فجوة $V = 10$ cm^3 ، و مقدار كل من المقاومات الصوتية $R_A = 10$ أوم صوتى فى م كجم ث. بإهمال تصحيحات النهايات أوجد السرعة الحجمية U_o عند نهاية الأنبوبة T_4.



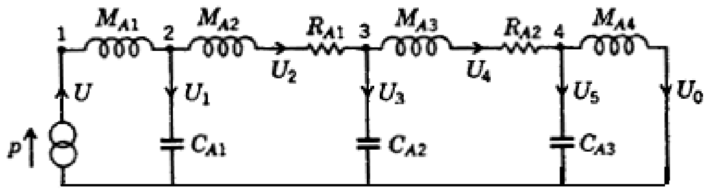
الشكل 3-31 جهاز صوتى يتكون من ثلاث فجوات V_1 ، V_2 ، و V_3 ، ساترين ذى شبكات رفيعة R_{A1} و R_{A2} ، وأربعة أنابيب قصيرة T_1 ، T_2 ، T_3 ، و T_4 و مولد ضغط - ثابت.

الحل

بتذكر أنه يوجد إتصال (إستمرارية) للسرعة الحجمية، للضغط عند الوصلات، يمكننا رسم دائرة مناظرة من نوع-المعاوقة بمجرد النظر. يبين الشكل 3- 32هذه الدائرة المناظرة. الخط السفلى فى الرسم التخطيطى يمثل الضغط الجوى، والذي يعنى أنه يوجد عنده ضغط متذبذب يساوى صفر. عند كل وصلة للعناصر من 1 إلى 4، يمكن ملاحظة ضغط تذبذبى مختلف. نهاية الأنبوبة الرابعة (T_4) مفتوحة إلى الجو، والأمر الذي يتطلب أن تكون M_{A4} متصلة مباشرة مع الخط السفلى فى الشكل 3-32.

لاحظ أن السرعة الحجمية للغاز المغادر للأنبوبة T_1 تساوى مجموع السرعات الحجمية للغاز الداخل V_1 و T_2. السرعة الحجمية للغاز المغادر للأنبوبة T_2 تساوى سرعة الداخل للساتر R_{A1} و تساوى مجموع السرعات الحجمية للغاز الداخل V_2 و T_3.

إن إختبار صلاحية الدائرة المناظرة يكون سلوكها مع التيار المستمر. إذا أزلنا المكبس ونفخنا فى نهاية الأنبوبة T_1 (الشكل 3-31)، نلاحظ تدفق مستمر من الهواء من T_4. سوف توجد بعض المقاومة للتدفق بسبب السواتر R_{A1} و R_{A2}. بالمثل فى الرسم التخطيطى للشكل 3-32، سوف يولد الضغط الثابت p تدفق مستمر U خلال M_{A4} ويقاوم هذا التدفق فقط بواسطة R_{A1} و R_{A2}.



الشكل 3-32 الدائرة المناظرة من نوع-المعاوقة للجهاز الصوتى المبين فى الشكل 3-31.

كتعليق جانبى، دعنا نلاحظ أن المطاوعة الصوتية يمكن أن تحدث فى دائرة ما بدون أن يكون أحد الأطراف متصل بالجهد الأرضى فقط إذا كانت متولدة بواسطة غشاء مرن (مطاطى). على سبيل المثال، إذا تم إستبدال المقاومة R_{A1} فى الشكل 3-31 بساتر مرن، فإن العنصر R_{A1} سوف تستبدل كما فى الشكل 3-32 بعنصر من نوع مطاوعة له طرفان فوق الجهد الأرضى. فى هذه الحالة ربما لأ تبقى عملية التدفق المستمر خلال الجهاز الموجود فى الشكل 3-31، كما يمكن رؤيته أيضاً من الدائرة فى الشكل 3-32، عند إستبدال R_{A1} بمطاوعة.

تعيين حجم العناصر فى الشكل 3-32.

$$p = \frac{f}{S} = \frac{10^{-5}\cos 1000t}{\pi(5\times10^{-3})^2} = 0.1273\cos 1000t \quad \text{newton/m}^2$$

$$M_{A1} = M_{A2} = M_{A3} = M_{A4} = \frac{\rho_o l}{S} = \frac{1.18\times0.05}{7.85\times10^{-5}} = 750 \ \text{kg/m}^4$$

$$C_{A1} = C_{A2} = C_{A3} = \frac{V}{\gamma P_o} = \frac{10^{-5}}{1.4\times10^{5}} = 7.15\times10^{-11} \ \text{m}^5\text{/newton}$$

$$R_{A1} = R_{A2} = 10 \ \text{mks} \quad \text{acoustic ohms}$$

وكما هو معتاد فى نظرية الدائرة-الكهربية، نقوم بتعيين U_o بطريقة غير مباشرة. أولاً ندع القيمة الاختيارية $U_o = 1\ \text{m}^3\text{/sec}$، ونقوم بتعيين النسبة p/U_o.

$$p_4 = j\omega M_{A4} U_o = j7.5\times10^5 \ \text{newtons/m}^2$$

$$U_5 = j\omega C_{A3}\, p_4 = -5.36\times10^{-2}\ \text{m}^3/\text{sec}$$

$$U_4 = U_5 + U_o = 0.946 \ \text{m}^3/\text{sec}$$

$$p_3 = (R_{A2} + j\omega M_{A3})U_4 + p_4 = 9.46 + j14.6\times10^5$$

$$U_3 = j\omega C_{A2}\, p_3 = -0.1043 + j6.77\times10^{-7}$$

$$U_2 = U_3 + U_4 = 0.842 + j6.77\times10^{-7}$$

$$p_2 = (R_{A1} + j\omega M_{A2})U_2 + p_3 = 17.37 + j2.091\times10^6$$

$$U_1 = j\omega C_{A1}\, p_2 = -0.1496 + j1.242\times10^{-6}$$

$$U = U_2 + U_1 = 0.692 + j1.919\times10^{-6}$$

$$p = j\omega M_{A2} U + p_2 = 15.93 + j2.61\times10^6 = \frac{p}{U_o} \qquad \text{for } U_o = 1$$

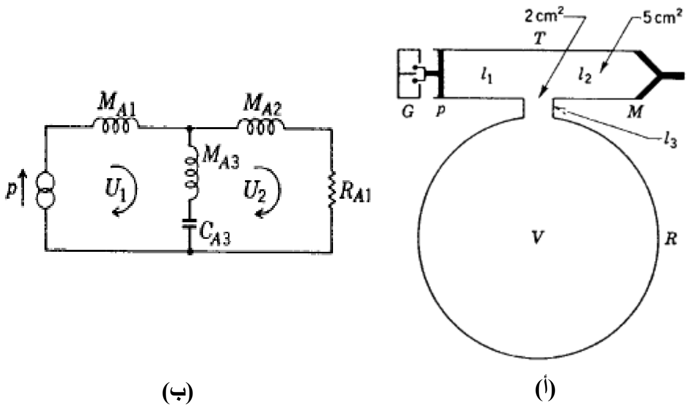
تكون قيمة U_o المطلوبة هي

$$U_o = p\frac{U_o}{p} = \frac{0.1273\cos 1000t}{15.93 + j2.61\times10^6} =\approx 4.88\times10^{-8}\sin 1000t$$

بمعنى أخر، تكون المعاوقة هى فى الأساس تلك المعاوقة للكتل الصوتية الأربعة المتصلة على التوالى لذلك فإن U_o تتأخر عن p بـ 90 درجة تقريباً.

المثال 3-5

كثيراً ما يستخدم مرنان هيلموتز كوسيلة لإزالة مركبة التردد غير المرغوبة من النظام الصوتى. يبين الشكل 3-33أ مثال لذلك. مولد القوة الثابتة G يولد سلسة من النغمات من بينها توجد نغمة غير مرغوبة. تشغل هذه النغمات ميكروفون M له معاوقة صوتية مقدارها 500 أوم صوتى فى م كجم ث. إذا كانت للأنبوبة T مساحة مقطع تساوى 5 سم^2، و $l_1 = l_2 = 5$ cm، و $l_3 = 3$ cm، و $V = 1000$ cm^3، و مساحة مقطع l_3 تساوى 2سم^2، فما هو التردد المعزول (المزال) من النظام؟



الشكل 3-33 (أ) جهاز صوتى يتكون من مولد قوة – ثابت G، ومكبس P ، و أنبوبة T لها طول $l_1 + l_2$، و ميكروفون M، و مرنان هيلموتز R له حجم V، وأنبوبة توصيل كالمبينة بالشكل. (ب) الدائرة المناظرة من نوع- المعاوقة للجهاز الموجود فى الشكل (أ).

الحل

بمجرد النظر يمكن رسم الدائرة المناظرة من نوع- المعاوقة فى الشكل 3-33ب. تكون أحجام العناصر كما يلى،

$$M_{A1} = M_{A2} = \frac{\rho_o l_1}{S_T} = \frac{1.18 \times 0.05}{5 \times 10^{-4}} = 118 \text{ kg/m}^4$$

$$M_{A3} = \frac{\rho_o l_T}{S_R} = \frac{1.18 \times 0.01}{2 \times 10^{-4}} = 59 \text{ kg/m}^4$$

$$C_{A3} = \frac{V}{\gamma P_o} = \frac{10^{-3}}{1.4 \times 10^5} = 7.15 \times 10^{-9} \text{ m}^5\text{/newtons}$$

$$R_{A1} = 500 \text{ mks} \quad \text{acoustic ohms}$$

من الواضح أن السرعة الحجمية U_2 لمحول الطاقة M سوف تكون صفراً عندما يكون فرع التوازى عند الرنين. بالتالي،

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{M_{A3} C_{A3}}} = \frac{10^4}{\sqrt{42.2}} = 1540 \text{ radians/sec}$$

$$f = 245 \text{ Hz}$$

الجزء الثامن - محولات الطاقة

يعرف محول (ناقل) الطاقة بأنه جهاز يحول الطاقة من شكل إلى شكل أخر. المهم فى هذا النص هو المحول الكهروميكانيكى الذي يحول الطاقة الكهربية إلى طاقة ميكانيكية والعكس. يوجد العديد من المحولات من هذا النوع. فى مجال الصوتيات سوف نهتم بالميكروفون، سماعات الأذن، السماعات، ولواقط التذبذب، وطرق التذبذب التى تكون بشكل عام عبارة عن شبكات خطية عابرة قابلة للإنعكاس.

يعتمد نوع محول الطاقة المختار لكل هذه الأجهزة على تلك العوامل مثل المعاوقة الكهربية أو الميكانيكية المطلوبة، المتانة، والتكلفة. سوف لن نتمكن هنا من مناقشة كل طرق التحويل الكهروميكانيكية. وبدلاً من ذلك، سوف نقصر مناقشتنا على الأنواع الكهرومغناطيسية والكهروستاتيكية فقط. أيضاً، سوف نتطرق إلى محولات الطاقة الميكانيكوصوتية التى تستخدم فى تحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة صوتية.

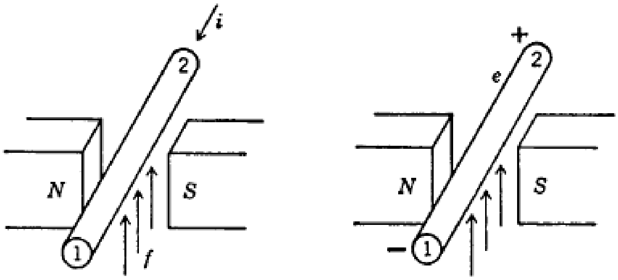
5-3 محولات الطاقة الكهروميكانيكية.

يوجد نوعان من محولات الطاقة الكهروميكانيكية هما المحولات الكهرو-مغناطيسية والمحولات الكهروستاتيكية، التى تستخدم فى السماعات والميكروفونات. يمكن تمثيل كلا النوعين بمحول كهربى لها خصائص تسمح بتوصيل الدوائر الميكانيكية والكهربية فى رسم تخطيطى واحد.

محول الطاقة الكهرومغناطيسى –الميكانيكى.

هذا النوع من محولات الطاقة يمكن أن يتميز بأربعة أطراف. إثنين لهم جهد ويصاحبهما تيار. والإثنين الأخرين لهما سرعة وقوة كخصائص قابلة للقياس. الأمثلة المألوفة هى السماعة أو الميكروفون ذات الملف - المتحرك وسماعة الأذن ذات الممانعة المغناطيسية - المتغيرة أو الميكروفون.

أبسط أنواع محول الطاقة ذو الملف - المتحرك هو الذي يكون عبارة عن طول من سلك مفرد في مجال مغناطيسي منتظم، كما هو مبين فى الشكل 3-34. عندما يتحرك السلك إلى أعلى بسرعة u كما فى الشكل 3-34أ، يتولد فرق جهد بين طرفية بحيث يكون الطرف 2 موجباً. على الجانب الأخر، عند تثبيت السلك فى المجال المغناطيسى (الشكل 34ب) وتمرير تيار i فى السلك إلى الطرف 2 (لذلك يكون الطرف 2 موجب) فإنه سوف تتولد قوة تؤثر على السلك لأعلى فى نفس اتجاه السرعة المبين من قبل.



(ب)
التيار i يولد قوة f تؤثرلأعلى

(أ)
للسرعة u إتجاه موجب لأعلى

الشكل 3-34 شكل مبسط لمحول طاقة ملف-متحرك يتكون من سلك مفرد يقطع مجال مغناطيسى له كثافة فيض B . (أ) يتحرك الموصل رأسياً بسرعة ثابتة لكى يولد جهد دائرة-مفتوحة عبر الطرفين 1 و 2. (ب) يدخل تيار ثابت إلى الطرف 2 ليولد قوة تؤثر على الموصل فى الاتجاه الرأسى.

المعادلات الأساسية القابلة للتطبيق على محول الطاقة من نوع الملف-المتحرك هى،

$$f = Bli \qquad \text{3-26أ}$$

$$e = Blu \qquad \text{3-26ب}$$

حيث $i =$ التيار الكهربى بالأمبير،

$f =$ قوة الدائرة-المفتوحة بالنيوتن المتولدة فى الدائرة الميكانيكية بواسطة التيار i.

$B =$ كثافة الفيض المغناطيسى بالوبر/م^2.

$l =$ الطول الفعال بالمتر للموصل الكهربى الذي يتحرك عمودياً على إتجاه الخطوط المغناطيسية للقوة التى لها كثافة فيض B .

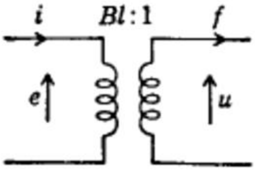
$u =$ السرعة بالمتر/ث.

$e =$ الجهد الكهربى "للدائرة المفتوحة" (بالفولت) المتولد بواسطة السرعة u.

للأطراف اليمنى من المعادلات 3-26 نفس الإشارة لأنه عندما يكون u و f فى نفس الاتجاه فإن الأطراف الكهربية يكون لها نفس الإشارة.

الرمز المناظر لهذا النوع من محولات الطاقة يكون محول كهربى مثالى كالمبين فى الشكل 3-35. يكون "اللفات" هذا المحول المثالى معاوقة لانهائية، ويطيع المحول المعادلات 3-26 عند كل الترددات، بما فى ذلك الحالة المستمرة. الجانب الميكانيكى من هذا الرمز بالضرورة يكون من نوع-الحركية إذا تدفق التيار فى الجانب الابتدائية. إن العمليات الرياضية الثابتة التى يمثلها هذا الرمز مدونة فى الجدول 3-1. تؤدى هذه العمليات مباشرة إلى المعادلات 3-26. تشير الأسهم إلى تدفق

موجب أو إلى جهد موجب.



الشكل 3-35 الرمز التناظرى لمحول الطاقة الكهرومغناطيسى-الميكانيكى المبين فى الشكل 3-35. يكون الجانب الميكانيكى من نوع-الحركية.

<u>محول الطاقة الكهروستاتيكى-الميكانيكى.</u>

يمكن أيضاً أن يتميز هذا النوع من محولات الطاقة بأربعة أطراف. عند إثنين يمكن قياس جهود وتيارات. وعند الإثنين الأخرين يمكن قياس القوى والسرعات. يمكن وصف هذا المحول بالعلاقات الرياضية التالية.

$$e = -\tau \xi \qquad \text{3-27أ}$$

$$f = \tau q \qquad \text{3-27ب}$$

حيث e = الجهد الكهربى "للدائرة المفتوحة" (بالفولت) المتولد بواسطة الإزاحة ξ.

ξ = الإزاحة (بالمتر) بأبعاد الجهاز الكهرروضغطى.

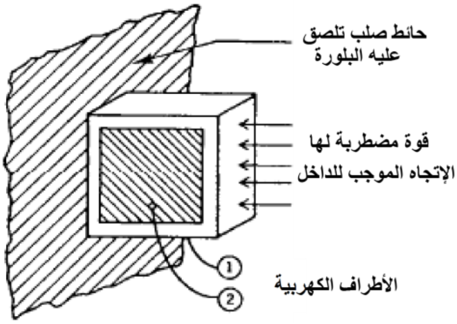
q = الشحنة الكهربية (بالكولوم) المختزنة فى العازل الكهربى للجهاز الكهروضغطى.

f = قوة "الدائرة-المفتوحة" (بالنيوتن) المتولدة بالشحنة الكهربية q.

τ = معامل الإزدواج[6] بأبعاد نيوتن/كولوم أو فولت/متر. إنه عدد حقيقى عندما تكون الشبكة خطية، سالبة (خاملة)، وقابلة للإنعكاس.

يبين الشكل 3-36 مثال لميكروفون البلورة الكهروضغطية. تسبب القوة المطبقة بشكل منتظم على وجه البلورة إزاحة للداخل مقدارها ξ. وكنتيجة لهذه الإزاحة يظهر فرق جهد e عبر الأطراف الكهربية 1 و 2. دعنا نفترض أن الإزاحة الموجبة (للداخل) لوجه البلورة تجعل الطرف 1 موجباً. عند الإزاحات الصغيرة يتناسب الجهد المتولد مع الإزاحة. والتأثير العكسى لهذه العملية هو عندما لا توجد قوة تؤثر على وجه البلورة وتم توصيل مولد كهربى إلى الطراف 1 و 2 بحيث يكون الطرف 1 موجباً. فى هذه الحالة تتولد قوة داخلية f تؤثر علي البلورة وتجعلها تتمدد. عند الإزاحات الصغيرة فإن القوة المتولدة f تتناسب مع الشحنة الكهربية (q) المختزنة فى مادة العازل الكهربى

للبلورة.



الشكل 3-36 محول طاقة من نوع بلورة كهروضغطية مثبتة على حائط صلب.

المعادلة 3-27 تكون فى العادة غير مناسبة لأنها تحتوي على الشحنة والإزاحة. من الأفضل أن نتعامل مع التيار والسرعة، واللتان تظهران مباشرة فى معادلة القدرة. يمكن عمل تحويلات التيار والسرعة بواسطة العلاقات،

$$u = \frac{d\xi}{dt} = j\omega\xi \qquad \text{3-28أ}$$

$$i = \frac{dq}{dt} = j\omega q \qquad \text{3-28ب}$$

بالتالي، تصبح المعادلات 3-27 على الصورة،

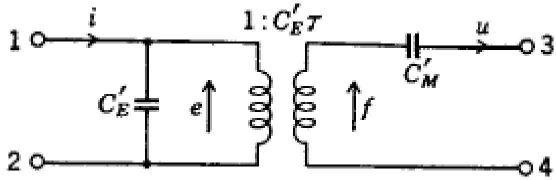
$$e = -\frac{\tau}{j\omega}u \qquad \text{3-229أ}$$

$$f = \frac{\tau}{j\omega}i \qquad \text{3-29ب}$$

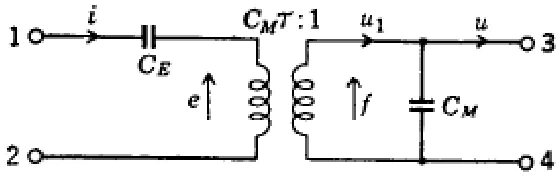
لسوء الحظ، لا يكون الرمز المناظر المألوف لهذا النوع من المحولات بسيطاً كما فى حالة النوع الكهرومغناطيسى-الميكانيكى. يبين الشكل 3-37 شكلين محتملين للرموز المناظرة. الجوانب الميكانيكية تكون مناظرة من نوع- المعاوقة. دعنا نناقش الشكل 3-37أ أولاً.

العنصر $C_M^{'}$ هو المطاوعة الميكانيكية لمحول الطاقة. لكى يمكن قياس $C_M^{'}$ يتم تطبيق قوة دافعة جيبية f على أطراف محول الطاقة 3 و 4 و يتم قياس الإزاحة الجيبية الناتجة. أثناء هذا القياس يتم عمل دائرة - قصر على الأطراف الكهربية ($e = 0$). يتم إستخدام قوة دافعة صغيرة جداً حتى يمكن

إهمال مفاعلة الكتلة والمقاومة الميكانيكية.



(أ)



(ب)

الشكل 3-37 رموز شكلين مناظرين لمحولات الطاقة الكهروضغطية. الجوانب الميكانيكية تكون من نوع-المعاوقة.

العنصـــر C'_E هو الســـعة الكهربية للبلورة المقاســـة عند ترددات منخفضـــة مع جعل الأطراف الميكانيكية دائرة – مفتوحة $(u=0)$. إن تطبيق التيار i إلى الجانب الإبتدائى ســـوف يولد جهد عبر المكثف C'_E مقداره $i/j\omega C'_E$، وهذا بدوره يولد قوة دائرة – مفتوحة تعطى بالعلاقة،

$$f=\frac{i}{j\omega C'_E}\tau C'_E=\frac{\tau i}{j\omega} \qquad 3\text{-}30$$

تولد السرعة u المطبقة على الجانب الثانوى من محول الطاقة بواسطة مولد خارجى تولد تيار خلال المكثف C'_E يساوى $-uC'_E\tau$. وهذا بدوره يولد جهد دائرة – مفتوحة يعطى بالعلاقة،

$$e=-uC'_E\tau\frac{1}{j\omega C'_E}=\frac{\tau u}{j\omega} \qquad 3\text{-}31$$

تبدو المعادلات 3-30 و 3-31 بأنها تساوى المعادلات 3-29.

فى الشكل 3-37ب، C_M هى أيضاً المطاوعة الميكانيكية لمحول الطاقة، لكن تقاس بطريقة مختلفة. يتم تطبيق قوة دافعة جيبية على الأطراف 3 و 4 لمحول الطاقة عند تردد منخفض جداً حتى يمكن إهمال مفاعلة الكتلة والمقاومة الميكانيكية. أثناء هذا القياس يجب أن تكون الأطراف الكهربية 1 و 2 دائرة – مفتوحة $(i=0)$. العنصر C_E تكون السعة الكهربية المقاسة عند ترددات منخفضة عند عمل دائرة – قصر على الأطراف الكهربية $(f=0)$.

إن تطبيق تيار i على الإبتدائى سوف يولد سرعة عبر المطاوعة C_M تساوى $C_M \tau i$. سوف تولد هذه السرعة قوة دائرة مفتوحة تعطى بالعلاقة،

$$f = \frac{\tau i}{j\omega} \qquad 3\text{-}32$$

السرعة u المطبقة عند الثانوى لمحول الطاقة بواسطة مولد خارجى تولد قوة عبر المطاوعة C_M تساوى $-u / j\omega C_M$. وهذه القوة بدورها تولد جهد عبر المطاوعة C_M يعطى بالعلاقة،

$$e = - = \frac{\tau u}{j\omega} \qquad 3\text{-}33$$

تبدو المعادلات 3-32 و 3-33 بأنها تساوى المعادلات 3-29. بالتالي تكون محولات الطاقة المبينة فى الشكل 3-37 متماثلة. ترتبط العناصر الموجودة فى الشكل 3-37 بالمعادلات:

$$C_R^{'} = \frac{C_E}{1 + C_M C_E \tau^2} \qquad 3\text{-}34$$

$$C_M = \frac{C_M^{'}}{1 + C_M^{'} C_E^{'} \tau^2} \qquad 3\text{-}35$$

$$C_E = C_E^{'}(1 + C_M^{'} C_E^{'} \tau^2) \qquad 3\text{-}36$$

$$C_M^{'} = C_M (1 + C_E C_M \tau^2) \qquad 3\text{-}37$$

حيث $C_E^{'} =$ السعة الكهربية المقاسة عند إعاقة (منع) الأطراف الميكانيكية حتى لا تحدث حركة $(u = 0)$.

$C_E =$ السعة الكهربية المقاسة عند تشغيل الأطراف الميكانيكية عند معاوقة ميكانيكية صفرية حتى لا تتكون قوة $(f = 0)$.

$C_M =$ المطاوعة الميكانيكية المقاسة عند جعل الأطراف الكهربية دائرة - مفتوحة $(i = 0)$.

$C_M^{'} =$ المطاوعة الميكانيكية المقاسة عند جعل الأطراف الكهربية دائرة - مغلقة $(e = 0)$.

عادة يتم عمل الإختيار بين الرموز المناظرة البديلة على أساس الإستخدام الذي سوف يوضع محول الطاقة من أجله. إذا كان المحول ميكروفوناً، فإنه عادة يتصل مع شبكة الأنبوبة المفرغة (النوع القديم

من المكبرات الإلكترونية) بحيث تكون الأطراف الكهربية دائرة – مفتوحة فى الأساس. فى هذه الحالة، تكون الدائرة فى الشكل 3-37ب هى الدائرة الأفضل للإستخدام، لأن C_E يمكن إهمالها فى التحليل حيث $i = 0$. على الجانب الأخر، إذا كان محول الطاقة عبارة عن سماعة، فإنها فى العادة تتصل على خرج مكبر منخفض-المعاوقة بحيث تكون الأطراف الكهربية دائرة – قصر فى الأساس. فى هذه الحالة، تكون الدائرة فى الشكل 3-37أ هى الدائرة الأفضل للإستخدام، لأن $C_E^{'}\omega$ تكون صغيرة مقارنة مع مسامحة المكبر.

تقابل الدائرة المبينة بالشكل 3-37أ الحقائق الفيزيائية بشكل أقرب من الدائرة المبينة فى الشكل 3-37ب. إذا أمكن إبقاء البلورة بدون حركة ($u = 0$) عند تطبيق الجهد على الأطراف 1 و 2، فإنه سوف لا توجد طاقة ميكانيكية مختزنة، وسوف تكون كل الطاقة المختزنة هى عبارة عن طاقة كهربية. هذا ما يحدث فى حالة الدائرة (أ) وليست الحالة (ب)، بالرغم من أن الدائرتين متماثلتين فى الإعتبارات الأخرى.

عند الترددات المنخفضة، يجب إعتبار الكتلة M_M و مقاومة البلورة R_M فى الدائرة. يمكن إضافة هذه العناصر على التوالى مع الطرف 3 فى الشكل 3-37.

تبين هذه الرموز المناظرة فرق مهم بين أنواع الربط الكهرومغناطيسة والأنواع الكهروستاتيكية. فى الحالة الكهرومغناطيسية، نستعمل بشكل عادى التناظر من نوع-الحركية، لكن فى الحالة الكهروستاتيكية نستخدم فى العادة تناظر من نوع-المعاوقة.

فى الجزء التالي سوف نقدم طريقة مختلفة لمعالجة محولات الطاقة الكهروستاتيكية. تتضمن هذه الطريقة إستعمال تناظر من نوع- الحركية بدلاً من التناظر من نوع-المعاوقة. سوف تظهر نتيجة بساطة التحليل فى الحال. بهذه الطريقة الجديدة يكون من الممكن أيضاً إستخدام التناظر من نوع-المعاوقة فى الحالة الكهرومغناطيسية.

3-6 محول الطاقة الميكانيكوصوتى.

يحدث هذا النوع من محولات الطاقة عند نقطة الإتصال بين الأجزاء الميكانيكية والأجزاء الصوتية فى الدائرة المناظرة. مثال ذلك هو عند المستوى الذي عنده يعمل غشاء السماعة الصوتية ضد الهواء. يمكن أن تميز محول الطاقة هذا بأربعة أطراف. عند طرفين من الأطراف يمكن قياس القوى والسرعات، وعند الطرفين الأخرين يمكن قياس الضغوط والسرعات الحجمية. تكون المعادلات

الأساسية القابلة للتطبيق فى المحولات الميكانيكوصوتية على الصورة،

$$f = S\,p \qquad \text{3-38أ}$$

$$U = S\,u \qquad \text{3-38ب}$$

حيث f القوة بالنيوتن، p الضغط بالنيوتن/م^2، U السرعة الحجمية بوحدات م^3/ث، u السرعى بالمتر/ث، و S المساحة بالمتر المربع.

الرموز المناظرة لهذا النوع من المحولات مدونة فى أسفل الجدول 3-3. من الواضح أن هذه الرموز تؤدى مباشرة إلى المعادلات 3-38.

3-7 أمثلة على حسابات محولات الطاقة.

المثال 3-6

سماعة صوتية مثالية ذات ملف - متحرك تولد 2 واط من القدرة الصوتية فى حمل صوتى مقدارة 4×10^4 أوم صوتى فى م كجم ث عند سحبها من مكبر له خرج جهد-ثابت مقداره 1 فولت. إذا كانت مساحة الغشاء (الرق) 100 سم^2، فما جهد الدائرة-المفتوحة الذي تولدة عندما تعمل كميكروفون يكون مقدار ج م م سرعة الغشاء 10 سم/ث؟

الحل

من الشكل 3-35 دائما نرى أن $e = Blu$. تعطينا القدرة المتبددة W ج م م السرعة الحجمية للغشاء U، أى أن،

$$U = \sqrt{\frac{W}{R_A}} = \sqrt{\frac{2}{2\times10^4}} = 7.07\times10^{-3}\ \text{m}^3\text{/sec}$$

أو $\mu = 0.707$ m/sec و

$$Bl = \frac{e}{u} = \frac{1}{0.707} = 1.4\ \text{volts/m} - \text{sec}$$

بالتالي، يكون جهد الدائرة المفتوحة لج م م السرعة 0.1 م/ث هو،

$$e = 1.316\times0.1 = 0.1316\ \text{volt}$$

المثال 3-7

لبلورة فوسفات الأمونيوم ثنائية الهيدروجين (ADP)، من النوع (قضيب- متوسع مقطوع عمودى على محور Z، Z-cut expander-bar) التى ستناقش فى الفصل السادس من الباب السادس، الصفات الميكانيكية والكهربية التالية:

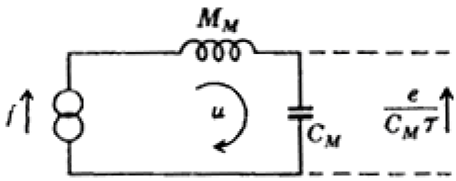
$\tau = 2\times 10^{8}$ نيوتن/كولوم، أو فولت/متر، $C_M = 9.5\times 10^{-8}$ m/newton ، $M_M = 1.47\times 10^{-4}$ kg ، $C_E = 26\times 10^{-12}$ farad ، و R_M صغيرة وتهمل.

تستخدم هذه البلورة فى الميكروفون مع غشاء دائرى (عديم الوزن). عين قطر الغشاء إذا كان الميكروفون مصمم لتوليد جهد دائرة-مفتوحة مقداره -70 db re1 volt لمستوى ضغط صوت مقداره 74 db re0.0002 microbar عند 10,000 cps؟

الحل

دائرة محول الطاقة هذا مع حذف المحول الكهربى تكون كما يبين الشكل 3-38. وبما أنه مطلوب جهد الدائرة-المفتوحة فقط، فإنه يمكن إهمال C_E فى الحسابات. f هى القوة الكلية المطبقة على البلورة بواسطة الغشاء. بالحل بالنسبة للجهد e نحصل على،

$$e = \frac{f\,C_M\,\tau}{1-\omega^2 C_M\,M_M}$$



الشكل 3-38 دائرة مناظرة من نوع-المعاوقة لميكروفون البلورى.

القوة f تساوى حاصل ضرب مساحة الغشاء S وضغط الصوت p . بالتالي، يكون الضغط،

$$p = 0.0002\,\text{antilog}\,74/20 = 1\ \text{dyne/cm}^2 = 0.1\text{newton/m}^2$$

وبالحل للجهد نحصل على،

$$\frac{1}{e} = \text{antilog}\frac{70}{20} = 3.16\times10^{3}$$

$$e = 3.16\times10^{-4}\quad \text{volts}$$

بالتالي،

$$S = \frac{f}{p} = \frac{3.16\times10^{-4}(1-9.5\times10^{-12}\times6.28^{2}\times10^{8})}{0.1\times19}$$

$$=1.57\times10^{-4}\quad \text{m}^{2} = 1.57\quad \text{cm}^{2}$$

هذه المساحة تكافئ غشاء (رق) له قطر 1.41 سم تقريباً

المثال 3-8

يقترن غشاء سماعة صوتية مع عنق "زور" بوق آسى له معاوقة صوتية مقدارها $300 + j300$ أوم صوتى فى نظام م كجم ث. إذا كانت مساحة غشاء السماعة S_D تساوى 0.08 م^{2}، عين حمل المعاوقة – الميكانيكى على الغشاء الناتج عن البوق.

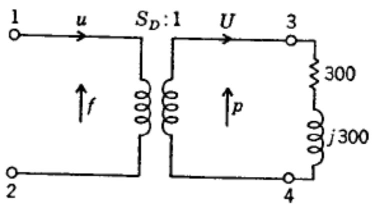
الحل

تكون الدائرة المناظرة كما هو مبين بالشكل 3-39. المعاوقة الميكانيكية عند الأطراف 1 و 2 تمثل الحمل على الغشاء.

$$Z_M = \frac{f}{u} = S_D^{2}(300 + j300)$$

$$= 6.4\times10^{-3}(300 + j300)$$

$$= 1.92 + j1.92\quad \text{mks mechanical ohms}$$



الشكل 3-39 محول طاقة ميكانيكوصوتى. تكون المعاوقة الصوتية (عند الأطراف3 و 4) هى الحمل على الغشاء مع معاوقة ميكانيكية على الصورة
. $Z_M = S_D^{2}(300 + j300)\quad \text{mks mechanical ohms}$

الجزء التاسع – نظريات الدائرة، الطاقة، والقدرة

فى هذا الجزء سنناقش التحويلات من نوع تناظر معين إلى النوع الأخر، مثل نظرية ثيفينين، علاقات الطاقة والقدرة، معاوقة محول الطاقة، ومحولات الطاقة المجمعة.

3-8 التحويل من تناظرات نوع-الحركية إلى تناظرات نوع-المعاوقة.

بينا فى الأجزاء السابقة أن محولات الطاقة الكهرومغناطيسية والكهرستاتيكية تحتاج نوعين مختلفين من التناظر عند تمثليها بالشبكات المبينة بالشكل 3-1. تظهر الحاجة الإضافية لنوعين التناظر من وجهة نظر جعل رسم الدائرة المناظرة سهلاً عند الفحص بمجرد النظر. يكون التناظر من نوع – الحركية أفضل للأنظمة الميكانيكية، والأنظمة الصوتية. مع ذلك، فإن الدوائر التى سوف نستعملها سوف تحتوى بشكل كثير على عناصر كهربية، ميكانيكية، وصوتية. وبما أنه لا يمكن خلط المناظرات فى الدائرة المعطاة فإنه يجب أن يكون لدينا وسائل بسيطة للتحويل من نوع إلى أخر.

يمكننا بسهولة إشتقاق شكل تناظرى من أخر إذا سلمنا بأن:

1- عناصر التوالى فى إحدى دوائر التناظر تطابق (تقابل) عناصر توازى فى الدائرة الأخرى.

2- العناصر من نوع-المقاومة تصبح عناصر من نوع-المستجيبية، والعناصر من نوع- السعة تصبح عناصر من نوع- الحث، والعناصر من نوع-الحث تصبح عناصر من نوع السعة..

3- مجموع الهبوط عبر عناصر التوالى فى شبيكة (مسار مغلق) أحد التناظرات يطابق مجموع التيارات عند النقطة الفرعية للتناظر الأخر.

هذا يكافئ للقول بأن تناظر ما يكون مزدوج (قرين) لتناظر أخر. نعرف من نظرية الدائرة-الكهربية أن الكميات التى "تتدفق" فى دائرة ما تكون هى نفسها مثل "الهبوطات" فى مزدوج تلك الدائرة. هذا يكون هنا حقيقى أيضاً.

لتسهيل التحويل من نوع تناظر إلى النوع الأخر سوف نستخدم طريقة تسمى بطريقة " النقطة " [7].

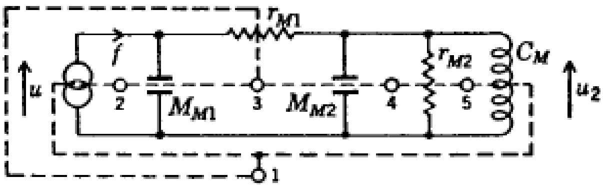
إفترض أن لدينا الدائرة المناظرة من نوع- الحركية المبينة بالشكل 3-17 وأننا نريد تحويلها إلى دائرة مناظرة من نوع-المعاوقة. تكون الطريقة المتبعة فى التحويل، كما هو مبين فى الشكل 3-40، على النحو التالي:

1- ضع نقطة عند مركز كل شبيكة (مسار مغلق) فى الدائرة ونقطة خارج كل الشبيكات. رقم هذه النقط على التوالى.

2- وصل النقط معاً بخطوط بحيث يوجد خط خلال كل عنصر ولا يمر خط خلال أكثر من عنصر.

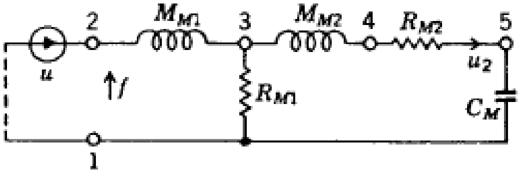
3- أرسم دائرة جديدة بحيث أن كل خط يصل بين نقطتين يحتوي على عنصر يكون عبارة عن معكوس (مقلوب) العنصر الموجود فى الدائرة الأصلية. يمكن إيجاد معكوس أى عنصر معين بمقارنة الأعمدة المقابلة لتناظرات نوع-الحركية وتناظرات نوع-المعاوقة فى الجدول 3-3. يبين الشكل 3-41 المعكوس الكامل (المزدوج) للشكل 3-40.

4- بالحل للسرعات أو القوى فى الدائرتين بإستخدام القواعد المدونة فى الجدول 3-1 يتبين بسهولة أنهما تعطيا نفس النتائج.



الشكل 3-40 التجهيز بطريقة "النقطة" لعمل مزدوج للشكل 3-17.

بعد إستكمال معلومات الدائرة المناظرة، من المفيد دائماً طرح التساؤل المتعلق بكل عنصر. عندما يصبح هذا العنصر صغيراً جداً أو كبيراً جداً هل ستتصرف الدائرة نفس سلوك الجهاز نفسه؟ فإذا تصرفت الدائرة عند النهايات بشكل صحيح، فإنها من المحتمل تكون صحيحة.



الشكل 3-41 مزدوج الدائرة المبينة فى الشكل 3-40. بالحل بالنسبة للسرعات أو القوى فى هذه الدائرة بإستخدام القواعد المدونة فى الجدول 3-1 نحصل على نفس قيم السرعات والقوى فى الشكل 3-40.

3-9 نظرية ثفينين.

من المناقشة السابقة، يتضح أنه من الممكن تمثيل عمل محول الطاقة بمجموعة من العناصر الكهربية، والميكانيكية، والصوتية. يحدث الإتصال بين الدائرة الكهربية والدائرة الميكانيكية من خلال محول الطاقة الكهروميكانيكى. بالمثل، يحدث الإتصال بين الدائرة الميكانيكية والدائرة الصوتية من خلال محول الطاقة الميكانيكو صوتى. يمكن كتابة نظرية ثيفينين للدوائر المجمعة، تماماً كما تكتب للدوائر

الكهربية فقط.

إن المتطلبات الواجب تحقيقها فى النص المناسب وإستخدام نظرية ثيفينين هى أن كل العناصر يجب أن تكون خطية وألا يوجد تأثيرات تخلفية. فى الفقرات القليلة القادمة سوف نعرض تطبيق نظرية ثيفينين فى مسألة سماعة صوتية.سوف يتم تمثيل معاوقة الإشعاع-الميكانيكية بواسطة الهواء للغشاء المهتز فى السماعة أو الميكروفون ببساطة بالرمز Z_{MR} فى التناظر من نوع-المعاوقة أو بالرمز $z_{MR} = 1/Z_{MR}$ فى التناظر من نوع-الحركية. سوف يتم مناقشة الطبيعة الفيزيائية الدقيقة لـ Z_{MR} فى الباب الخامس.

بفرض سماعة صوتية (بملف-متحرك) كهرومغناطيسية بسيطة بغشاء له كتلة فقط وملف صوتى له مقاومة كهربية فقط (أنظر الشكل 3.-42أ). بفرض أن هذه السماعة تعمل تحت تأثير مولد جهد - ثابت. بإستخدام نظرية ثيفينين، نرغب فى إيجاد المولد الميكانيكى المكافئ u_o و الحركية الميكانيكية المكافئة z_{MS} للسماعة، كما ترى عند السطح الجانبى بين الغشاء والهواء. يبين الشكل 3-42ب الدائرة الموجودة فى الشكل 3-42أ بدون محول كهربى. يبين الشكل 3-42ج دائرة ثفينين المكافئة. نحصل على قيم u_o و z_{MS} فى خطوتين.

1- عين سرعة الدائرة-المفتوحة u_o بواسطة تحديد السماعة بحركية لانهائية $z_{MS} = \infty$ (بمعنى أن $Z_{MA} = 0$) و من ثم قياس سرعة الغشاء u_o. وكما ناقشنا فى الجزء الثانى، يمكن الحصول على $Z_{MA} = 0$ بتوصيل (بطريقة صوتية) الغشاء إلى أنبوبة لها طول يساوى ربع الطول الموجى. يكون هذا ممكناً عند الترددات المنخفضة.

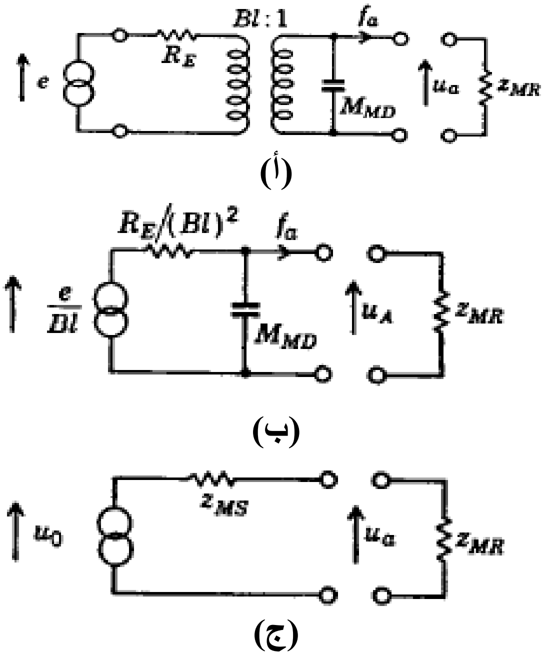
بفحص الشكل 3.-42ب يتبين أن،

$$u_o = \frac{eBl}{j\omega M_{MD} R_E + (Bl)^2} \qquad 3\text{-}39$$

2- قم بعمل دائرة – قصر على المولد دون تغيير معاوقة الشبيكة فى هذا الجزء من الدائرة الكهربية. حينئذاً عين الحركية z_{MS} بالنظر للخلف إلى أطراف خرج السماعة. على سبيل المثال، بالنسبة للدائرة المبينة فى الشكل 3-42ب فإن z_{MS} تساوى مجموع التوازى للكميات $1/j\omega M_{MD}$

و $R_E/(Bl)^2$ ، أى أن.

$$z_{MS} = \frac{R_E}{j\omega M_{MD} R_E + (Bl)^2} \qquad 3\text{-}40$$



الشكل 3-42 الدوائر المناظرة لسماعة مبسطة بملف – متحرك تبعث الصوت فى الهواء. (أ) الدائرة المناظرة، (ب) نفس الدائرة بدون المحول الكهربى، (ج) دائرة ثفينين المكافئة لنفس الدائرة.

تكون دائرة ثيفينين المكافئة للسماعة (بالنظر إلى الغشاء) كما هى مبينة بالشكل 3-42ج، حيث u_o و الحركية z_{MS} تعطيان بالمعادلات 3-39 و 3-40 على وجه الترتيب.

إن تطبيق نظرية ثيفينين كما نوقشت من قبل كمثال للنظريات العامة التى تطبق فى الأساس على الشبكات الخطية الهامدة (أى التى لا تحتوى على مكبرات، المترجمون) يمكن أن تطبق بفائدة كبيرة على الأنظمة الميكانيكية والصوتية التى تتضمن محولات طاقة.

3-10 علاقات الطاقة والقدرة

العناصر الكهربية

إن التعبيرات الرياضية للطاقة المختزنة فى عناصر الملف الحثى والمكثف للدوائر الكهربية مألوفة

لمعظم الطلاب وذلك من الدراسات الأساسية للفيزياء ونظرية الدائرة. هذه التعبيرات هى،

الطاقة المغناطيسية اللحظية المختزنة

$$T(t) = \frac{1}{2}L[i(t)^2] \qquad \text{3-41}$$

الطاقة الكهربية اللحظية المختزنة

$$V(t) = \frac{1}{2}C[e(t)^2] \qquad \text{3-42}$$

حيث $i(t)$ و $e(t)$ هما التيار اللحظى فى الملف والجهد اللحظى عبر المكثف، على الترتيب.

فى الحالة الثابتة للتردد ω تصبح هذه المعادلات على النحو،

$$T(t) = \frac{1}{2}L|i|^2(1+\cos 2\omega t) \qquad \text{3-43}$$

$$V(t) = \frac{1}{2}C|e|^2(1+\cos 2\omega t) \qquad \text{3-44}$$

حيث $|i|$ و $|e|$ هما ج م م القيم المركبة للتيار خلال العناصر L و C و للجهد عبرها، على الترتيب. للكميات T و V مركبة ثابتة ومركبة مترددة لها ضعف التردد الأصلى. فى المتوسط، تكون المركبة المترددة تساوى الصفر، لذلك،

$$T_{avg} = \frac{1}{2}L|i|^2 \quad \text{watt-sec} \qquad \text{3-45}$$

$$V_{avg} = \frac{1}{2}C|e|^2 \quad \text{watt-sec} \qquad \text{3-46}$$

فى المتوسط، تتبدد القدرة فى العناصر المقاومية فقط. تكون القدرة اللحظية $W(t)$ المتبددة فى المقاومة R لتيار جيبى هى،

$$W(t) = R|i|^2(1+\cos 2\omega t) \qquad \text{3-47}$$

فى المتوسط تكون المركبة المترددة تساوى الصفر وبالتالي،

$$W_{avg} = R|i|^2 \quad \text{watts} \qquad \text{3-48}$$

العناصر الميكانيكية والصوتية.

من الميكانيكا الأساسية، أصبح الطالب ملماً أيضاً بعلاقات الطاقة والقدرة للعناصر الميكانيكية: الكتة، المطاوعة، والمقاومة. فى الجدول 3-4 تم تدوين ملخص لقيم الحالة الثابتة، W_{avg}، T_{avg}، و V_{avg} للعناصر الكهربية، الميكانيكية، والصوتية. من الطريف ملاحظة أن، T_{avg} للتناظر من نوع-الحركية نفس شكل V_{avg} للتناظر من نوع-المعاوقة والعكس بالعكس صحيح. نحن الأن مستعدون لإستخدام هذه المفاهيم للطاقة والقدرة فى التحليل الدوائر الكاملة الكهرو-ميكانيكو-صوتية.

الجدول 3-4 القيم المتوسطة للقدرة المتبددة والطاقة المختزنة (تم إستخدام قيم جذر متوسط المربعات للكميات المتغيرة مع الزمن).

صوتية	ميكانيكية	نوع التناظر	العنصر	العنصر، أنظر الجدول 3-2
$r_A\|p\|^2$	$r_M\|f\|^2$	حركية	$R\|i\|^2$	W_{avg}
$R_A\|U\|^2$	$R_M\|u\|^2$	معاوقة		
$\frac{1}{2}C_A\|p\|^2$	$\frac{1}{2}C_M\|f\|^2$	حركية	$\frac{1}{2}L\|i\|^2$	T_{avg}
$\frac{1}{2}M_A\|U\|^2$	$\frac{1}{2}M_M\|u\|^2$	معاوقة		
$\frac{1}{2}M_A\|U\|^2$	$\frac{1}{2}M_M\|u\|^2$	حركية	$\frac{1}{2}C_E\|e\|^2$	V_{avg}
$\frac{1}{2}C_A\|p\|^2$	$\frac{1}{2}C_M\|f\|^2$	معاوقة		

دوال الطاقة والقدرة فى الدوائر المجمعة (المتحدة)

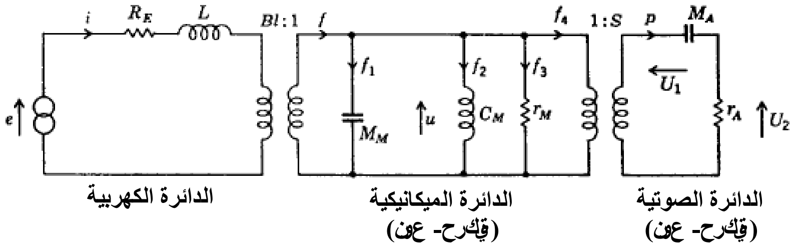
فى الدائرة الكاملة الكهرو-ميكانيكو-صوتية لجهاز كثل سماعة الصوت، يمكن إستخدام علاقات الطاقة والقدرة للعناصر المنفردة لتعيين القدرة الكلية الفاعلة والمفاعلة الممدودة (المجهزة) بواسطة المولد.

كمثال، دعنا نفترض بشيء من التفصيل دائرة السماعة الصوتية المبينة بالشكل 3-43. محول الطاقة يكون من النوع الكهرومغناطيسى-الميكانيكى، والذي يحتاج إلى إستخدام تناظر الحركية فى الأجزاء الميكانيكية وبالتالي الأجزاء الصوتية فى الدائرة.

منطقياً، إن القدرة الكلية الممدودة بواسطة المولد e إلى الدائرة يجب أن تساوى مجموع القدرات المتبددة فى العناصر المقاومية لأن الدائرة من النوع السالب. تعطى القدرة المسلمة بواسطة السماعة للهواء بواسطة القدرة المتبددة فى المستجيبية الصوتية r_A. من الجدول 3-4 نجد أنه فى حالة الحركية

أن القدرة الكلية للدائرة المبينة فى الشكل 3-43 تساوى،

$$W_{avg} = R_E |i|^2 + r_M |f_3|^2 + e_A |p|^2 + \qquad 3\text{-}49$$



الشكل 3-43 الدائرة المناظرة الكاملة لسماعة صوتية (بملف-متحرك) ذات مشع-مباشر.

نعلم أن الكمية الكلية للطاقة الحثية T_{avg} المختزنة فى الدائرة يجب أن تكون مجموع الطاقات المختزنة فى العناصر من النوع-الحثى المنفردة. من الجدول 3-4 نرى أنه بالنسبة لتناظر الحركية أن T_{avg} الكلية للشكل 3-43 تساوى،

$$T_{avg} = \frac{1}{2} L|i|^2 + \frac{1}{2} C|f_2|^2 \qquad 3\text{-}50$$

بالمثل، وجد أن الطاقة السعوية V_{avg} المختزنة فى العناصر من النوع-السعوى تكون،

$$V_{avg} = \frac{1}{2} M_M |u|^2 + \frac{1}{2} M_A |U_1|^2 \qquad 3\text{-}51$$

عن طريق الضبط لإختيار وحدات النظام م كجم ث التى فعلناها مبكراً فى هذا النص، يجب ملاحظة أن الإضافة المباشرة للقدرات والطاقات الكهربية والميكانيكية والصوتية ممكنة فى المعادلات 3-49 إلى 3-51 بشرط أن كل الكميات تكون معطاة فى النظام م كجم ث. على خلاف ذلك، إذا كانت الفولتات والأمبيرات مستخدمة فى الدائرة الكهربية و وحدات سم جم ث فى الدوائر الميكانيكية والصوتية، فإن الطاقة سوف تكون بالجول فى الدائرة الكهربية وبالإرج فى الدوائر الميكانيكية والصوتية. يكون تحويل الإرج إلى جول، بضرب عدد الإرجات فى 10^{-7}، ضرورياً قبل أن تكون الإضافة ممكنة.

<u>القدرة الفاعلة والمفاعلة (active & reactive power)، القدرة الموجهة (Vector power)</u>

من الشائع فى نظرية الدائرة-الكهربية الحديث عن القدرة الموجهة بأنها عبارة عن المجموعة التربيعية للقدرة الفاعلة والقدرة المفاعلة. من التعريف فإن القدرة الموجهة المستمدة من مولد تكون عبارة عن

حاصل ضرب التيار والمرافق المركب للجهد عند المصدر.

$$\text{Vector power} = W_{avg} + jQ_{avg} = e^* i \qquad 3\text{-}52$$

حيث e^* هو المرافق المركب لج م م الجهد e عند المصدر و i هو ج م م التيار عند المصدر. لاحظ أنه إذا كان $e = |e|\angle\phi$، فإن $e^* = |e|\angle -\phi$. وبما أن $i = e/Z$ يمكن كتابة المعادلة السابقة على الصورة،

$$W_{avg} + jQ_{avg} = \frac{|e|^2}{Z} \qquad 3\text{-}53$$

حيث $|e|$ مقدار ج م م الجهد عبر المعاوقة المركبة Z. من الواضح أن القدرة الفاعلة W_{avg} فى الدائرة الهامدة يجب أن تكون موجبة دائماً. لكن، من الممكن أن يكون للقدرة المفاعلة إشارة موجبة فى الدائرة من نوع - السعة السائدة وإشارة سالبة فى الدائرة من نوع – الحث السائد. تكون وحدات W_{avg} هى الواط، وتسمى وحدات Q_{avg} بالفولت-أمبير مفاعلى (var، إختصار volt-amper reactive).

يمكن أيضاً كتابة المعادلة 3-53 على الصورة،

$$W_{avg} + jQ_{avg} = |i|^2 Z^* \qquad 3\text{-}54$$

حيث Z^* المرافق المركب للمعاوقة Z. على سبيل المثال إذا كانت $Z = R + jX$ فإن $Z^* = R - jX$.

فى الدائرة المركبة، مثل المعطاة فى الشكل 3-43، يمكن إيجاد القدرة الموجهه الكلية المستمدة من المولد بجمع القدرات الموجهه المستمدة إلى كل عنصر فى الدائرة. فى حالة الدائرة الكهربية الخالصة نحصل على،

$$W_{avg} + jQ_{avg} = \sum e_k^* i_k = \sum |i_k|^2 Z_k^* = \sum \frac{|e_k|^2}{Z_k} \qquad 3\text{-}55$$

حيث i_k هو التيار المركب للعنصر رقم k الذي له معاوقة Z_k. يكون الجهد عبر العنصر رقم k هو e_k. للدوائر الكهرو-ميكانيكو-صوتية معادلات مشابهة. على سبيل المثال، من الشكل 3-43،

وبتذكر أن لدينا تناظر حركى، نجد أن،

$$W_{avg} + jQ_{avg} = |i|^2 (R_E - jL\omega) - \frac{|f_1|^2}{jM_M\omega} - |f_2|^2 jC_M\omega + |f_3|^2 r_M + |p|^2 \left(\frac{j}{M_M\omega} + r_A \right)$$

أو

$$W_{avg} + jQ_{avg} = (|i|^2 R_E + |f_3|^2 r_M + |p|^2 r_A) + 2j\omega \left(-\frac{1}{2}L|i|^2 + \frac{1}{2}\frac{|f_1|^2}{jM_M\omega^2} - \frac{1}{2}|f_2|^2 C_M + \frac{1}{2}\frac{|p|^2}{M_M\omega^2} \right) \qquad 3\text{-}56$$

مما سبق نرى أن الكميات الموجودة بين الأقواس الأولى هى نفسها تماماً كما هى موجودة فى المعادلة 3-49. أما بخصوص ما بين الأقواس الثانية، فمن المعادلة 3-2 نرى أن $|f_1|^2 = \omega^2 M_M^2 |u|^2$ و من المعادلة 3-22 $|p|^2 = \omega^2 M_A^2 |U_1|^2$. وبمقارنة الأقواس الثانية فى المعادلة 3-.22 مع المعادلات 3-50 و 3-51 نرى أن القيمة فى هذه الأقواس الثانية تساوى $V_{avg} - T_{avg}$.

بشكل عام، القدرة المفاعلة تكون على الصورة،

$$Q_{avg} = 2\omega(V_{avg} - T_{avg}) \qquad 3\text{-}47$$

يتم إيجاد الطاقة المختزنة الكلية V_{avg} و T_{avg} بالطرق الموصوفة بالإرتباط مع المعادلات 3-50 و 3-51. يجب ملاحظة أنه عند الرنين فإن متوسط الطاقة المختزنة فى العناصر من نوع-الحث T_{avg} تساوى بالضبط متوسط الطاقة المختزنة فى العناصر من نوع-السعة V_{avg}، وبالتالي تكون القدرة الكلية المفاعلة التى تستمد بواسطة المولد تكون صفراً.

أخيراً، يتبين من المعادلات 3-54 و 3-57 أن المعاوقة التى تمثل المولد تساوى،

$$Z = \frac{W_{avg} - jQ_{avg}}{|i|^2} = \frac{W_{avg} + j2\omega(T_{avg} - V_{avg})}{|i|^2}. \qquad 3\text{-}58$$

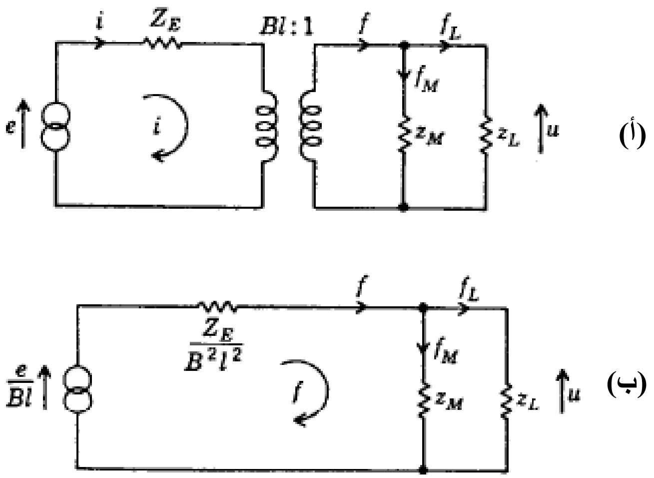
11-3 معاوقات محول الطاقة.

الأن، دعنا ننظر عن قرب إلى المعاوقات عند أطراف محولات الطاقة الكهروميكانيكية. فى السنوات الأخيرة، أصبح من الشائع لدى المتخصصين فى الدوائر-الكهربية التعبير عن معادلات دوائرهم فى شكل مصفوفة. إن ترميز المصفوفة هو أسلوب مكثف لكتابة أنظمة المعادلات الخطية[8]. سوف نعبر عن خصائص محولات الطاقة فى مصفوفة لمن لديهم ألفة بهذا المفهوم. إن شرح العمليات الرياضية المختلفة التى تجرى فى المصفوفات يقع خارج إهتمام هذا الكتاب.

ينصح الطالب الذي لا يألف نظرية المصفوفات أن يتعامل مباشرة مع المعادلات الخطية التى تم إشتقاق المصفوفة منها. ومع ذلك، فإن معرفة نظرية المصفوفات غير ضرورية لفهم أى مادة موجودة فى هذا الكتاب.

دعنا نعين مصفوفة المعاوقة لمحول الطاقة الكهرومغنيطوميكانيكى المبين فى الشكل 6-44أ. فى هذه الدائرة Z_E هى المعاوقة الكهربية المقاسة عند الأطراف الميكانيكية "المعاقة"، بمعنى أن عندما تكون $u=0$، z_M هى الحركية الميكانيكية للعناصر الميكانيكية فى محول الطاقة مقاسة عند جعل الدائرة الكهربية "دائرة-مفتوحة"، و z_L هى الحركية الميكانيكية للحمل الصوتى على الغشاء.

الكمية Bl هى عبارة عن حاصل ضرب كثافة الفيض فى الطول الفعال للسلك الذي يقطع خطوط القوى عمودياً.



الشكل 3-44 الدوائر المناظرة لمحول طاقة كهرومغناطيسى-ميكانيكى. الجانب الميكانيكى يكون من نوع-الحركية.

بإزالة المحول الكهربى من الشكل 3-44أ نحصل على دائرة مكونة من شبيكتين (مساران مغلقان) كما هو مبين بالشكل 3-44ب. تكون معادلات الدائرة على الصورة،

$$e = i\,Z_E + uBl \qquad 3\text{-}59$$

$$0 = -i\,Bl + u(Z_M + Z_L) \qquad 3\text{-}60$$

حيث $Z_M = 1/z_M$ ، $Z_L = 1/z_L$ ، و $f = Bl\,i$. يتم رسم مصفوفة المعاوقة من هذه المعادلات وتكون مصفوفة مربعة مكونة من أربعة معاوقات على الصورة،

$$z = \begin{bmatrix} Z_E & Bl \\ -Bl & Z_M + Z_L \end{bmatrix} \qquad 3\text{-}61$$

يتم إيجاد المعاوقة الكهربية الكلية Z_{ET} كما ترى من مولد الجهد من المصفوفة أو من المعادلات 3-59 و 3-60 وتكون على الصورة،

$$Z_{ET} = Z_E + \frac{(Bl)^2}{Z_M + Z_L} \qquad 3\text{-}62$$

يسمى الحد الثانى فى الجانب الأيمن من العادلة بالمعاوقة الحركية لأنه، عندما يعاق الجانب الميكانيكى بحيث لا توجد حركة، فإن $Z_{ET} = Z_E$. تبين هذه المعادلة حقيقة مثيرة، بمعنى، أن محول الطاقة الكهرومغناطيسى هو عبارة عن محول معاوقة كهربية. نعنى بكلمة المحول الأخيرة بأن مفاعلة الكتلة فى الجانب الميكانيكى تصبح مفاعلة سعوية عند الإشارة إلى الجانب الكهربة من المحول الكهربى، والعكس عند العكس صحيح. بالمثل، تنعكس المفاعلة الحثية فى الجانب الكهربى خلال المحول الكهربى إلى مطاوعة ميكانيكية. تتضح هذه الإقرارات بواسطة الشكل 3-47.

فى حالة محول الطاقة الكهروستاتيكى-الميكانيكى من النوع المبين فى الشكل 3-45، فإن معادلات الدائرة تكون على الصور،

$$e_0 = i\,Z - u\frac{\tau}{j\omega} \qquad 3\text{-}63$$

$$0 = -i\frac{\tau}{j\omega} + u(Z_M + Z_L) \qquad 3\text{-}64$$

حيث $Z_E \equiv Z'_E + \dfrac{1}{j\omega C'_M}$ هى المعاوقة الكهربية عند إعاقة الحركة الميكانيكية، Z_L هى المعاوقة الميكانيكية للحمل الصوتى على الغشاء، و $Z_M \equiv R_M + j\omega M_M + \dfrac{1}{j\omega C_M}$ هى المعاوقة الميكانيكية للعناصر الميكانيكية فى محول الطاقة مقاسة عند $i = 0$، و $C_M = \dfrac{C'_M}{1 + C'_M C'_E \tau^2}$ هى المطاوعة الميكانيكية فى محول الطاقة مقاسة عند $i = 0$.

تكون مصفوفة المعاوقة على الصورة،

$$z = \begin{bmatrix} Z_E & -\tau / j\omega \\ -\tau / j\omega & Z_M + Z_L \end{bmatrix} \qquad \text{3-65}$$

هذه المصفوفة تكون متماثلة حول القطر الرئيسى، كما فى أى شبكة كهربية هامدة عادية. على النقيض تكون المصفوفة (3-61) متخالفة التماثل. بالنسبة للمسائل العابرة، أستبدل $j\omega$ بالمؤثر $s = d/dt$ [7].

تكون مصفوفة المعاوقة لمحول الطاقة الكهروستاتيكى فى الغالب مماثلة فى الشكل مع مصفوفة المعاوقة لمحول الطاقة الكهرومغناطيسى، والفرق هو أن الحدود المتبادلة لها نفس الأشارة عند مقارنتها بالإشارات المعاكسة فى الحالة الكهرومغناطيسية.

فى حالة محول الطاقة الكهروستاتيكى تكون المعاوقة الكلية على الصورة،

$$Z_{ET} = Z_E - \frac{\tau^2 / j^2 \omega^2}{Z_M + Z_L} = Z_E + \frac{\tau^2 / \omega^2}{Z_M + Z_L} \qquad \text{3-66}$$

يسمى الحد الثانى على الجانب الأيمن بالمعاوقة الحركية، كما ذكرنا من قبل.

مرة أخرى نرى أن محول الطاقة يعمل كنوع من محولات المعاوقة. المفاعلة الميكانيكية الموجبة المضافة $(+X_M)$ تأتى خلال محول الطاقة كمفاعلة كهربية سالبة.

يمكن توضيح بعض الحقائق المثيرة بفرض أن لدينا محول طاقة كهروستاتيكى وأخر كهرومغناطيسى، كل متحكم بالجسوء فى الجانب الميكانيكي بحيث

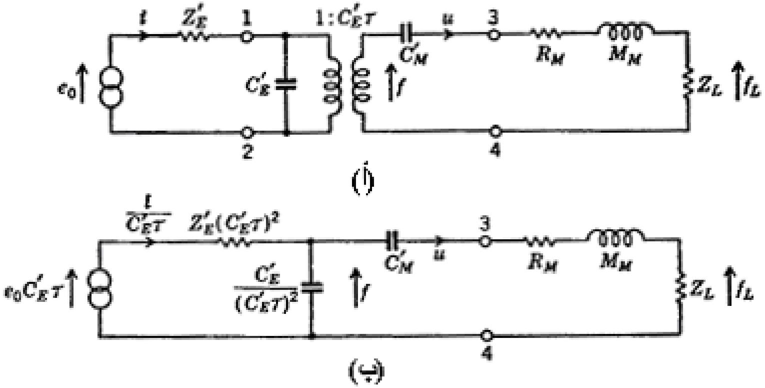
$$Z_M + Z_L = \frac{1}{j\omega C_{M1}} \qquad \text{3-67}$$

بالتعويض بالمعادلة 3-67 فى المعادلة 3-62 نحصل على،

$$Z_{ET} = Z_E + j\omega(B^2 l^2 C_{M1}) \qquad 3\text{-}68$$

تظهر المطاوعة الميكانيكية C_M من الجانب الكهربى كمحاثة كهربية لها المقدار $B^2 l^2 C_{M1}$.
بالتعويض الأن بالمعادلة 3-67 فى المعادلة 3-66 نحصل على،

$$Z_{ET} = Z_E + j\frac{\tau^2 C_{M1}}{\omega} \qquad 3\text{-}69$$



الشكل 3-45 دوائر مناظرة لمحول طاقة كهروستاتيكى-ميكانيكى. يكون الجانب الميكانيكى من نوع-المعاوقة.

تظهر المطاوعة الميكانيكية C_M لمحول الطاقة لهذا من الجانب الكهربى كسعة سالبة، بمعنى أن C_{M1} تظهر كمحاثة لها مقدار يتغير عكسياً مع ω^2. إن تأثير هذا ببساطة يكون إختزال قيمة C_{M1}. الطريقة الأخرى للنظر إلى ذلك هو أن تلاحظ من الشكل 3-45 أنه فى حالة $R_M = M_M = 0$ و $Z_L = 1/j\omega C_{ML}$، فإن المطاوعة الكلية تكون أقل من C_M بسبب المطاوعة المضافة C_{ML}.

3-12 تجمعات محولات الطاقة الكهروستاتيكية والكهرومغناطيسية.

يدعى المهندس أحياناً لضم محول طاقة كهرومغناطيسى وأخر كهروستاتيكى معاً كهربياً وميكانيكياً بواسطة مسار تغذية عكسية، مثلاً. بالنظر إلى الأشكال 3- 44أ و 3-45أ يتبين أنه لا يمكن عمل مثل هذا الإتصال مباشرة، لأن لدينا تناظر نوع-حركية على الجانب الثانوى فى إحدى الدوائر وتناظر من نوع-المعاوقة على نفس الجانب فى الدائرة الأخرى. تم تطوير إحدى الطرق للتغلب على هذه الصعوبة [9]. بالنظر إلى مصفوفات المعاوقة (المعادلات 3-61 و 3-65) يتضح أنه يمكن إستخدام

نفس الدائرة لكلا النوعين من الأجهزة على أن يتم إدخال بعض الوسائل لتغيير الإشارات للحدود المتبادلة. لعمل ذلك، سوف يتم إدخال ما يسمى "المؤثر β ".

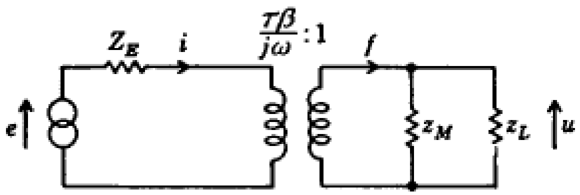
إن طريقة تحويل إحدى مصفوفات المعاوقة إلى مصفوفة أخرى تتم بضرب الحدود المتبادلة فى إحدى المصفوفات فى مؤثر β إختيارى. هذا المؤثر يكون عبارة عن "دوار إتجاه" بـ 90 درجة و

$$\begin{aligned} \beta^2 &= -1 \\ \beta^4 &= 1 \\ j\beta &= -\beta\, j \end{aligned} \qquad 3\text{-}70$$

على سبيل المثال، يمكن رسم دائرة محول الطاقة الكهروستاتيكى كما هى مبينة بالشكل 3-46. تكون مصفوفة المعاوقة لتلك الدائرة على الصورة،

$$z = \begin{bmatrix} Z_E & \tau\beta / j\omega \\ -(\tau\beta / j\omega) & Z_M + Z_L \end{bmatrix} \qquad 3\text{-}71$$

تعطى المعاوقة الكلية لتلك الدائرة، مع تطبيق المعادلة 3-71 أعلاه، بالمعادلة 3-66. يجب الإنتباه بأنه يجب إستبدال الكمية β^2 بـ (-1) حتى يتم إختزال المعادلات إلى شكلها النهائى. بهذا نتجنب مشكلة تقرير إذا ما كان يجب إستبدال العدد السالب بـ j أو β عند أخذ الجذر التربيعي.



الشكل 3-46 الدائرة المناظرة من نوع-الحركية، بإستخدام مؤثر β ، لمعالجة محولات الطاقة الكهروستاتيكية-الميكانيكية. عن الإستعمال فى المسائل العابرة، إستبدل $j\omega$ بالمؤثر s .

فى الشكل 3-46، ذهاباً من اليسار إلى اليمين، تكون السرعة $u = iz\,\tau / j\omega / \beta$، و ، ذهاباً من اليمين إلى اليسار، يكون جهد الدائرة-المفتوحة $e = f_o\,\tau z / j\omega / -\beta$، بالتالي تكون معاوقات المحول الكهربى فى الإتجاهين سالبة بالنسبة لبعضهما البعض.

عندما تظهر كل من β و j فى نسبة المحول (التحويل) فإن قيم مركبات الطاقة المختزنة T_{avg} و V_{avg} تكون مساوية لتلك الموجودة عند عدم ظهور أى منهما فى نسبة التحويل، لأن

$$j^2\beta^2 = \frac{j^2}{\beta^2} = 1 \qquad 3\text{-}72$$

من الناحية التحليلية تكون نتائج الطاقة والقدرة مماثلة لتلك التى توجد من المعادلات 3-50، 3-51، 3-56، و3-57.

بنفس الإسلوب، يمكن رسم الدائرة لمحول الطاقة الكهرومغناطيسى كما هى مبينة فى الشكل 3-37ب إذا كانت نسبة محول الطاقة هى $jBl\beta C_M\omega:1$. فى هذه الحالة، فإن مصفوفة المعاوقة سوف تكون على الصورة،

$$z = \begin{bmatrix} Z_E & -Bl\beta \\ -Bl\beta & Z_M + Z_L \end{bmatrix} \qquad 3\text{-}73$$

يتم إيجاد المعاوقة الكهربية الكلية من هذه المصفوفة وتكون مثل التى يتم الحصول عليها من المعادلة 3-62.

المثال 3-9

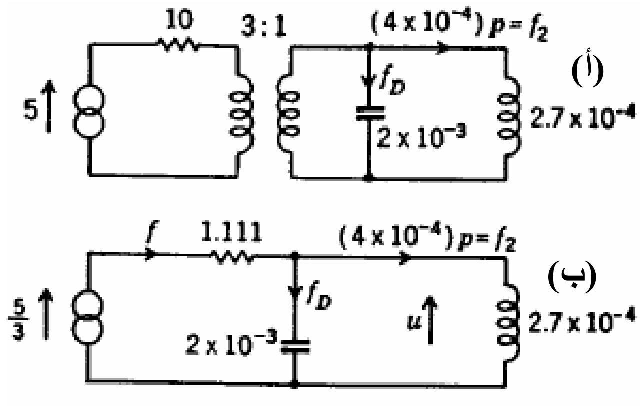
تم تمثيل سماعة أذن ذات ملف - متحرك تعمل عند ترددات أعلى من تردد الرنين لها بالدائرة المبينة بالشكل 3-42أ. كانت السمات الميكانيكية والكهربية كما يلى،

$$R_E = 10 \text{ ohms} \qquad \& \qquad B = 10^4 \text{ gauss } (1 \text{ weber/m}^2)$$

$$l = 3 \text{ m} \qquad \& \qquad M_{MD} = 2 \text{ g}$$

$$z_{MR} = j\omega 2.7\times 10^{-4} \text{ m/newton-sec}$$

حيث z_{MR} الحركية التى يراها الغشاء عندما تكون سماعة الأذن موضوعة فى الأذن، $M_{MD} = 2$ g كتلة الغشاء، R_E و l مقاومة وطول السلك الملفوف على الملف الصوتى، و B هى كثافة الفيض المقطوع بالملف المتحرك. عين مستوى ضغط الصوت المتولد عند الأذن عند تردد 1000 دورة فى الثانية عندما تعمل السماعة على مكبر ذات معاوقة منخفضة جداً و له جهد خرج مقداره 5 فولت. إفترض أن مساحة الغشاء تساوى 4 سم^2.



الشكل 3-47 الدوائر المناظرة للمثال 3-9.

الحل

يبين الشكل 3-47أ الرسم التخطيطى لدائرة السماعة مع حجم العناصر فى وحدات النظام م كجم ث. بإزالة المحول الكهربى نحصل على الدائرة المسومة فى الشكل 3-47ب. بالحل نحصل على،

$$u = f_z z_{MR} = (4\times10^{-4}\, p)\, j6280(2.7\times10^{-4})$$
$$= j6.78\times10^{-4}\, p$$

$$f_D = j\omega M_{MD} u = -8.54\times10^{-3}\, p$$

$$f = f_D + f_z = -8.14\times10^{-3}\, p$$

$$5/3 = u + 1.111 f = p(j6.78\times10^{-4} - 9\times10^{-3})$$

$$|p| = \frac{1.66\times10^{2}}{0.9} \approx 185 \text{ newton/m}^2$$

$$\text{SPL} = 20\log\frac{185}{2\times10^{-5}} = 139.3 \text{ db re } 0.0002 \text{ microbar}$$

المثال 3-10

تم توصيل محولين طاقة، أحدهما بلورة كهروضغطية و الأخر ملف متحرك فى مجال مغناطيسى، إلى كتلة $M_{M2} = 1.533$ kg كما بالشكل 3-48أ. عين الطاقة الكهربية المختزنة فى المكثف C_E

عند تردد 100 هيرتز بفرض الثوابت التالية،

$e = 1\text{volt}$, $R_E = 10\Omega$, $B = 1 \text{ weber/m}^2$, $l = 30$ m

$C_E = 4\times10^{-9}$ farad , $M_{M1} = 1.0$ kg . $\tau = 1.28\times10^7$

$\omega = 628$ radians/sec

الحل

يبين الشكل 3-48ب الرسم التخطيطى لمحولات الطاقة، بينما يبين الشكل (ج) تبسيط إضافى لهذا المخطط. لتعيين قيمة z_{M1} نلاحظ أن مزدوج الشكل (د) يكون كما بالشكل (هـ).

$$\frac{1}{z_{M1}} = Z_{M1} = j\omega(M_{M1} + M_{M2}) - j\frac{1}{C_M\omega}$$
$$= j(629 + 964) - j1593 = 0$$

بمعنى أخر، تكون الحركية مالا نهاية عند 100 هيرتز. لذلك تبسط الدائرة فى الشكل (ج) إلى الدائرة فى الشكل (و). بإستخدام نظرية التراكب، يمكن تقسيم i_2 إلى جزئين i'_2 و i''_2 كما بالدائرتين فى الأشكال(ز) و (ح)، وبالتالي $i_2 = i''_2 - i'_2$.

$$\frac{\tau}{Bl\omega} = \frac{1.28\times10^7}{1\times30\times628} = 680$$

$$\frac{1}{\omega C_E} = 4\times10^5$$

$$i'_2 = \frac{e\tau\beta / Bl\, j\omega}{(R_E\tau^2 / B^2l^2\omega^2) + (1/ j\omega C_E)} = \frac{eBl\,\omega}{jR_E\tau} = \frac{1}{j6800}$$

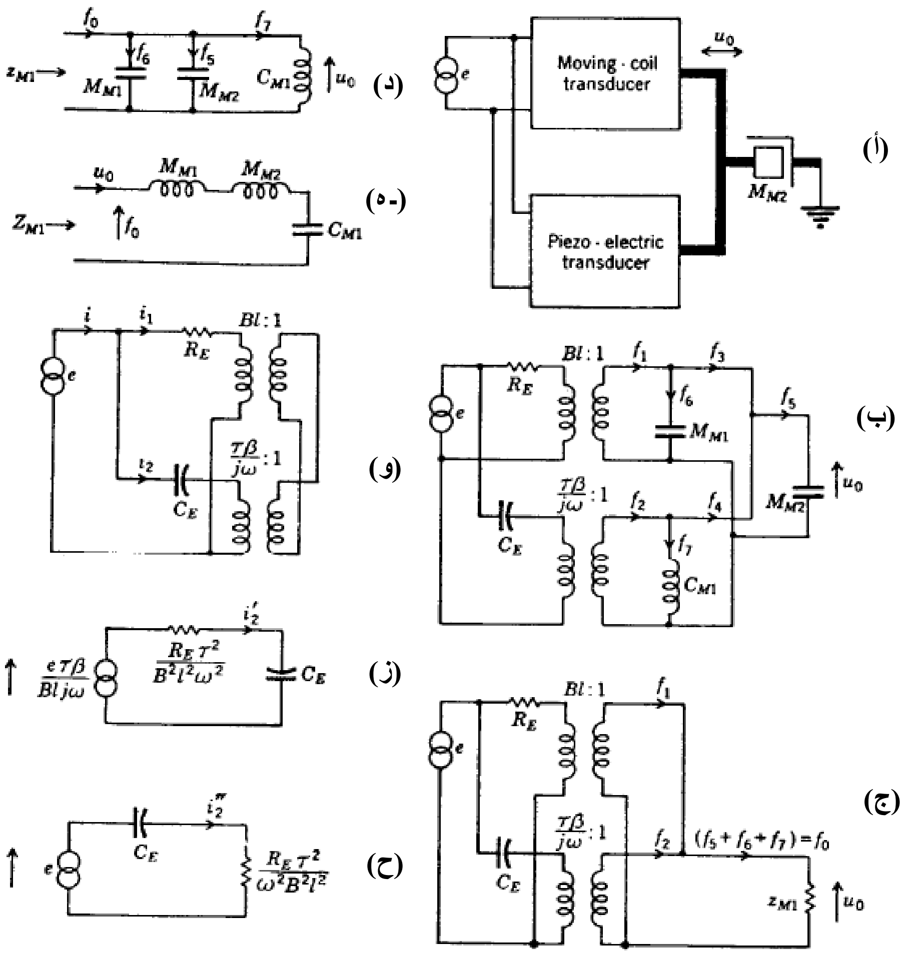
$$i''_2 = \frac{e\omega^2B^2l^2}{R_E\tau^2} = \frac{1}{(10)(680)^2} = \frac{1}{4.64\times10^6}$$

$$i_2 = i''_2 - i'_2 = j1.47\times10^{-4}$$

$$|i_2| = 1.47\times10^{-4} \text{ amp}$$

يكون هبوط الجهد عبر المكثف هو

$$|e_e| = 1.47\times10^{-4}\times4\times10^{5} = 59 \text{ volts}$$



الشكل 3-48 محولات طاقة كهروستاتيكة-كهرومغناطيسية مجتمعة. (أ) مخطط ميكانيكى للجهاز. (ب) الدائرة المناظرة مع حركيات على الجانب الميكانيكة. تم إستخدام مؤثر β فى محول الطاقة الكهروضغطى. (ج) كما فى (ب) ماعدا أن z_{M1} تحل محل الحركيات الموجودة على التوازى المبينة بواسطة (د). (هـ) مزدوج (د). (و) بسبب أن للدائرة (د) حركية مالا نهاية، فإن (ب) تبسط إلى هذا الشكل. (ز) و (ح) حل (و) بواسطة التراكيب.

وتكون الطاقة الكهربية المختزنة فى المكثف C_E هى

$$\frac{1}{2}C_E|e_e|^2 = 2\times10^{-9}\times3.48\times10^{3} = 7\times10^{-6} \text{ watt-sec}$$

مراجع هذا الباب

1-B. Gehshoj, " Electromechanical and Electroacoustical Analogics," Academy of Technical Science, Copenhagen, 1947.

2-F.A. Firestone, A New Analogy between Mechanical and Electrical Systems, J. Acoust. Soc. Amer., 4: 249-267 (1933); The Mobility Methode of Computing the Vibrations of Linear Mechanical and Acoustical Systems: Mechanical-electrical Analogies, J. Appl. Phys., 9: 373-387 (1938).

3-H. F. Olson, " Dynamical Analogies," D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1943.

4-W.P. Mason, Electrical and Mechanical Analogies, Bell Systems Tech. J., 20: 405-414 (1941)

5-A. Bloch, Electro-mechanical Analogies and Their Use for the Analysis Mechanical and Electro-mechanical Systems, J. Inst. Elect. Eng., 92: 157-169 (1945).

6- مراراً ما يعرف معامل الإزدواج بشكل تفاضلي فى الكتب الحديثة لمحولات الطاقة الكهروستاتيكية-الميكانيكية. على سبيل المثال، فى بعض النصوص يعرف بأنه الجذر التربيعي للمقدار $8/C'_M C'_E \tau^2 \pi^2$، حيث C'_M و C'_E تعرفان بالمعادلة 3-37. لا يعنى المؤلف بأنه يجب تبنى تعريف معامل لإزدواج في هذا النص كمعيار. بالأحرى، تم إستعمال هذا التعبير ببساطة من أجل تسهيل المناقشة.

7- M. F. Gradner and J.I. Barnes, " transients in Linear Systems," pp. 46-49, Jhon Wiley & Sons, Inc. New York 1942.

8- P. Le Corbeiller, "Matrix Analyses of Electric Networks." Harvrd University Press, Cambridge, Mass, and Jhon Wiley & Sons, Inc. New York, 1950.

9- F.V. Hunt, " Symmetry in the equations for electromechanical Coupling," Paper B1, presented at the thirty-ninth meeting of the Acoustic Society of America.

الباب الرابع
إشعاع الصوت
RADIATION OF SOUND

لكي يمكن وصف المصدر الصوتى بشكل تام، بالإضافة إلى الخصائص الأخرى، يجب علينا معرفة السمات التوجيهية له عند كل الترددات ذات الاهتمام. تكون بعض المصادر غير توجيهية، بمعنى أنها تشع الصوت بشكل متساوى في جميع الاتجاهات ومثل تلك المصادر تسمى مشعات كروية. البعض الأخر ربما يكون توجيهى بشكل قوى، إما بسبب أن حجمها يكون كبير طبيعياً بالمقارنة مع الطول الموجى أو بسبب التصميم الخاص.

أغلب الأنواع الأولي لمشعاع الصوت يكون عبارة عن مصدر كروي له نصف قطر صغير مقارنة مع سدس الطول الموجى. يسمى مثل هذا المشعاع مصدر بسيط أو مصدر نقطى. تتعين خصائص المصدر بمقدار سرعة سطحه وطوره المنسوب إلى مصدر مرجعى معين. المصادر الأكثر تعقيداً مثل المشعاعات المستوية والمنحنية يمكن أن تعالج تحليلياً كمجوعة (كتجمع) من المصادر البسيطة التى يكون لكل منها سرعة سطح وطور خاص به.

من الاعتبارات ذات الأهمية الخاصة عند تصميم السماعات الصوتية، الأبواق هى السمات التوجيهية لها. يخدم هذا الباب كأساس مهم للأبواب اللاحقة المتعلقة بالسماعات، الأبواق، ومصادر الضوضاء.

إن المفاهيم الأساسية التى تحكم إشعاع الصوت يجب أن تفهم تماما في البداية. حينئذ يمكن من تلك المفاهيم التفكير في استنتاج أداء أي جهاز معين أو في تخطيط أنظمة جديدة. هنا تم تقديم أمثلة من نماذج الإشعاع المقاس لسماعات شائعة كدليل على تطبيق المفاهيم الأساسية.

الجزء العاشر
نماذج التوجيهية — DIRECTIVITY PATTERNS

تكون نماذج التوجيهية لمحولات الطاقة المستخدمة لانبعاث أو استقبال الصوت عبارة عن وصف (بيانيً في العادة) لاستجابة محول الطاقة كدالة في اتجاه الموجات الصوتية المنبعثة أو الساقطة على مستوى معين وعند تردد معين. في هذا النص، تم استخدام عرض الشعاع لنموذج التوجهيه للتعبير عن المسافة الزاوية بين نقطتين على جانبى المحور الأساسى حيث يكون مستوى ضغط الصوت 6

ديسيبل أقل من قيمته عند $\theta = 0$.

1-4 المصادر الكروية [1,2]

المصدر الكروى هو الأبسط للأخذ في لاعتبار لأنه يشع الصوت بشكل موحد في جميع الاتجاهات. كما رأينا من المعادلة 2-62، فإن ضغط الصوت، عند نقطة تبعد مسافة r في أى اتجاه من مركز مصدر كروى له أى نصف قطر في الفضاء الحر، يعطى بالعلاقة،

$$p(r,t) == \frac{\sqrt{2}\,A_+}{r}\,e^{j(\omega t - kr)} \qquad 4\text{-}1$$

حيث A_+ هو قيمة ج م م (جذر متوسط مربعات) ضغط الصوت عند وحدة المسافة من مركز الكرة.

<u>نموذج التوجيهية.</u>

يبين الشكل 4-1 مخطط قطبى، وهو عبارة عن مخطط يمثل نموذج للتوجيهية عند أى سطح مستوى يقطع مركز الكرة الذى يمثل المصدر. من الواضح أنه مصدر غير موجهه.

<u>المصدر البسيط (المصدر النقطى)[3]</u>

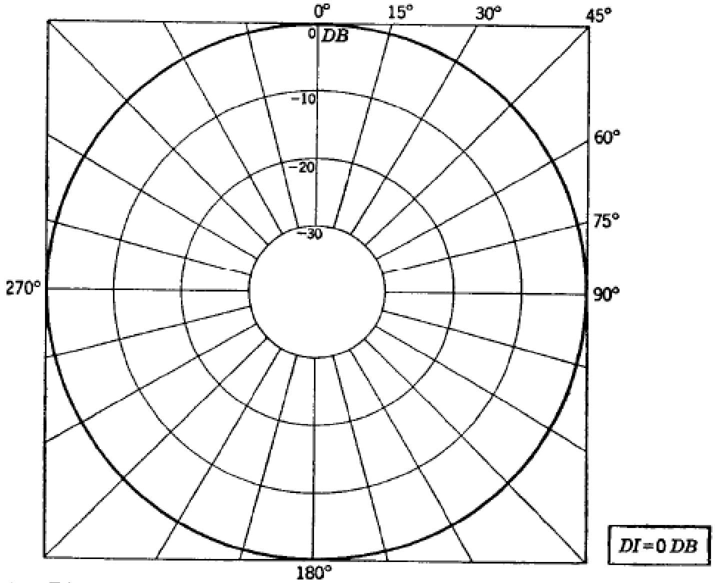
في الحالة الخاصة للمصدر الصغير جداً، الذى له نصف قطر a يكون صغير مقارنة مع سدس طول الموجة (بمعنى أن $ka << 1$)، فإن السرعة عند سطح الكرة (ارجع للمعادلة 2-63) تعطى بالعلاقة التالية،

$$u(a,t) = \frac{\sqrt{2}\,A_+}{\rho_o\,c\,a}\,\frac{c}{j\,2\pi f a}\,e^{j(\omega t - ka)} \qquad 4\text{-}2$$

يسمى المصدر الذى يوصف بهذه المعادلة بالمصدر البسيط. بالتعويض من المعادلة 4-2 في المعادلة 4-1 نحصل على،

$$p \approx j\,\frac{U_o\,f\,\rho_o}{2r}\,e^{-jk(r-a)} \qquad 4\text{-}3$$

حيث U_o ج م م السرعة الحجمية (م^3/ث) لمصدر صغير جداً و تساوى $(4\pi a^2)u_{rms}$ ، p ج م م ضغط الصوت (بالنيوتن/م^2) عند مسافة r من المصدر البسيط.



الشكل 4-1 نموذج التوجهية لمصدر غير موجهه. يتم رسم هذا النموذج على مستوى معين يقطع مركز المصدر. دليل التوجهية DI (تم تعريفه في الجزء الحادى عشر) يساوى 0 ديسيبل عند كل الزوايا.

قوة المصدر البسيط[3]

تعرف قوة المصدر البسيط بأنها قيمة ج م م التدفق الكلى للهواء عند سطح مصدر بسيط (م^3/ث) ويرمز لها بالرمز U_o. (في بعض المراجع يتم استخدام قيمة الذروة بدلا من جذر متوسط المربعات. في هذه الكتب تكون قوة المصدر البسيط هى $\sqrt{2}(4\pi a^2)u_{rms}$)

القوة عند مسافة r

عند مسافة r من مركز مصدر بسيط تعطى القوة بالعلاقة،

$$I = \frac{|p|^2}{\rho_o c} = \frac{U_o^2 f^2 \rho_o}{4r^2 c} \quad \text{watts/m}^2 \qquad 4\text{-}4$$

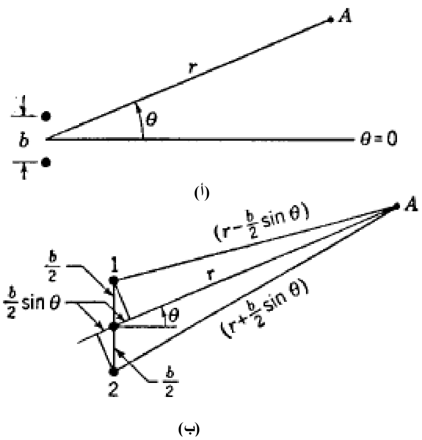
عندما تكون أبعاد المصدر أقل بكثير من الطول الموجى فإن الإشعاع الصادر منه سيكون تقريبا نفس الشيء بغض النظر عن شكل المشعاع طالما كانت كل أجزاء المشعاع تتذبذب بشكل أساسى في نفس الطور. تتناسب الشدة (القوة) عند أى نقطة طردياً مع مربع السرعة الحجمية والتردد.

2-4 مجموعات المصادر البسيطة[4]

يمكن تعلم المبادئ الأساسية التى تحكم نماذج التوجهية للسماعات الصوتية بدراسة مجموعات المصادر البسيطة. تكون هذه المعالجة شبيهة بالمبدأ الخاص بمويجات هيجنز في البصريات. بشكل أساسى، مشكلتنا هى أن نجمع، بشكل اتجاهي، في النقطة المطلوبة في الفضاء، ضغوط الصوت التى تصل إلى تلك النقطة من كل المصادر البسيطة. دعنا نرى كيفية تطبيق هذه الطريقة.

مصدرين بسيطين في طور واحد.

يبين الشكل 4-2 الشكل الهندسي لهذه الحالة. يتم افتراض أن المسافة r من المصدرين النقطيين إلى النقطة A (التى عندها يتم قياس الضغط p) تكون كبيرة مقارنة مع المسافة الفاصلة بين المصدرين.



الشكل 4-2 مصدرين بسيطين (نقطيين) يهتزان في طور واحد بينهما مسافة b ويبعدان مسافة r (بزاوية θ) عن نقطة القياس A.

موجة الصوت الكروية التى تصل عند النقطة p من المصدر 1 سوف تسافر مسافة $r-(b/2)\sin\theta$ ، ويكون ضغط الصوت على الصورة،

$$p_1(r_1,t)=\frac{\sqrt{2}\,A_+}{r}e^{j\omega t}\,e^{-j(2\pi/\lambda)[r-(b/2)\sin\theta]} \qquad \text{4-5أ}$$

سوف تسافر موجة الصوت من المصدر 1 مسافة $r+(b/2)\sin\theta$ ، ولهذا يكون ضغط الصوت

،

$$p_2(r_2,t) = \frac{\sqrt{2}\,A_+}{r} e^{j\omega t}\, e^{-j(2\pi/\lambda)[r+(b/2)\sin\theta]} \qquad \text{4-5ب}$$

بفرض أن $r >> b$ فإن المجموع $p_1 + p_2$ يكون على الصورة،

$$p(r,t) = \frac{\sqrt{2}\,A_+}{r} e^{j\omega t}\, e^{-j(2\pi/\lambda)r}\left(e^{j(\pi b/\lambda)\sin\theta} + e^{-j(\pi b/\lambda)\sin\theta}\right) \qquad \text{4-6}$$

بضرب البسط والمقام في المعادلة 4-6 في $e^{j\pi b\sin\theta/\lambda} - e^{-j\pi b\sin\theta/\lambda}$ واستبدال الأسس بالجيوب نحصل على،

$$p(r,t) = \frac{\sqrt{2}A_+}{r}\, e^{j\omega t}\, e^{-j(2\pi r/\lambda)}\, \frac{\sin[(2\pi b/\lambda)\sin\theta]}{2\sin[(\pi b/\lambda)\sin\theta]} \qquad \text{4-7}$$

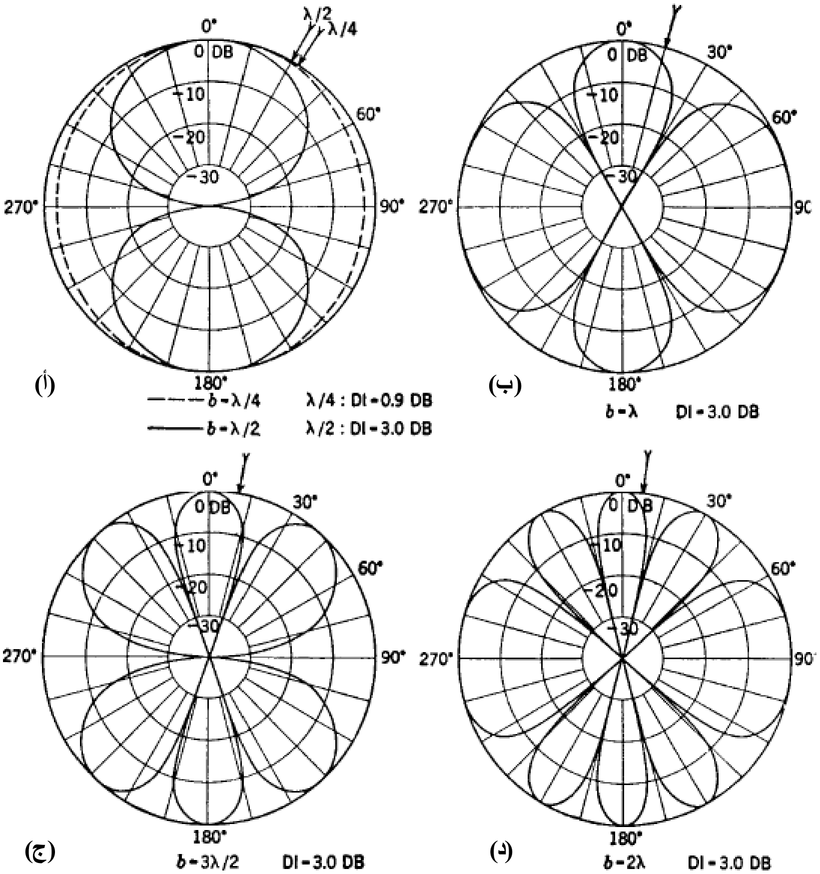
تكون معادلة مقدار ج م م ضغط الصوت على الشكل،

$$|p| = \frac{2A_+}{r}\left|\frac{\sin[(2\pi b/\lambda)\sin\theta]}{2\sin[(\pi b/\lambda)\sin\theta]}\right| \qquad \text{4-8}$$

جزء هذه المعادلة خلال خطوط مستقيمة يعطى نموذج التوجهية.

بالرجوع إلى الشكل 4-2، نرى أنه إذا كانت r صغيرة جداً مقارنة مع الطول الموجى، فإن المصدرين يلتئمان (يتحدان) بشكل أساسى وتكون قيمة الضغط عند المسافة r عند أي زاوية θ ضعف قيمته في حالة تأثير مصدر واحد منفرد. سوف يكون نموذج التوجهية كما هو المبين في الشكل 4-1. لكن، كلما أصبحت b أكبر، فإن الضغوط الواصلة من المصدرين سوف تختلف في الطور وسوف لا يكون نموذج التوجهية دائرة.

بمعنى أخر، سوف تشع المصادر الصوت في بعض الاتجاهات بشكل أفضل من الاتجاهات الأخرى. وكمثال محدد، بفرض أن $b = \lambda/2$، عند $\theta = 0$ أو 180 درجة يتضح أن الضغط الواصل إلى النقطة A من أحد المصادر سيكون ضعف الضغط الواصل من المصدر الأخر. لكن، عند $\theta = \pm 90^o$ فإن زمن السفر بين المصدرين البسيطين يكون مضبوطاً تماماً بحيث الإشعاع الصادر من أحد المصادر يلاشى الإشعاع من المصدر الأخر. بالتالى، يكون الضغط عند كل النقط على امتداد $\pm 90^o$ على المحور مساويا للصفر. تذكر أن مناقشتنا اقتصرت على اعتبار أن $r >> b$.



الشكل 4-3 نماذج التوجهية للمصدرين البسيطين في طور واحد الممثلين في الشكل 4-2. يحدث تماثل نماذج التوجهية حول المحور المار بين المصدرين. بالتالى، يلزم مستوى واحد لوصف سمات دليل التوجهية عند أى تردد معين. تم تدوين دليل التوجهية في كل حالة عند $\theta = 0$. كما تمت الإشارة إلى دليل **توجهية صفرية واحد بالسهم. (تم مناقشة دليل التوجيهية في الجزء الحادى عشر).**

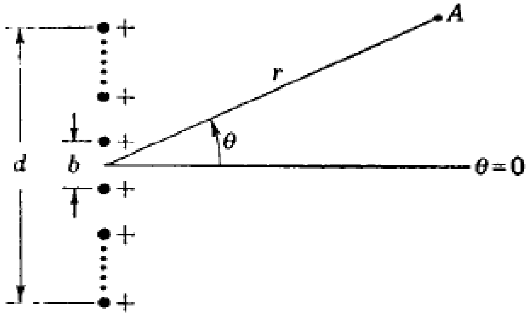
يبين الشكل 4-3 نماذج التوجهية معبر عنها بوحدة الديسيبل منسوبة إلى الضغط عند $\theta = 0$ لمصدرين في طور واحد عند $b = \lambda/4$، $\lambda/2$، λ، $3\lambda/2$ و عند 2λ.

تنطبق الملاحظة المهمة جداً التى نلاحظها من نماذج التوجيهية للمشعاع من هذا النوع البسيط على كل أنواع الإشعاع. الملاحظة هى أنه كلما زاد طول المشعاع (هنا بمعنى كلما زادت قيمة b)، فإن البروز الفصى (شكل الفص) الرئيسى سوف يزداد حدة (يصبح أرفع) على طول المحور عند أي تردد معطى كما سوف يزداد عدد الفصوص الجانبية. في الفقرة التالية سوف نرى أيضاً أنه من الممكن خمد (إعاقة) الفصوص الجانبية، بمعنى الفصوص الأخرى غير الرئيسة والتى توجد عند الزوايا صفر و 180 درجة، وذلك ببساطة بزيادة عدد العناصر.

المصفوفة الخطية للمصدر البسيط.[4]

يبين الشكل 4-4 الوضع الهندسى لهذا النوع من المصفوفات المشعة. ج م م ضغط الصوت المتولد عند النقطة A بواسطة n من المصادر البسيطة المتماثلة التى تكون في طور واحد وتقع على خط مستقيم طولة $d=(n-1)b$ (حيث b المسافة الفاصلة بين كل منها والأخر، و d صغيرة مقارنة مع المسافة r) يكون على الصورة،

$$|p|=\frac{nA_+}{r}\left|\frac{\sin[(n\pi b/\lambda)\sin\theta]}{n\sin[(\pi b/\lambda)\sin\theta]}\right| \qquad 4\text{-}9$$



الشكل 4-4 مصفوفة خطية تتكون من n من المصادر البسيطة التى تتذبذب في طور واحد وتنفصل بمسافة b. يبعد مركز المصفوفة مسافة r بزاوية θ عن نقطة القياس A.

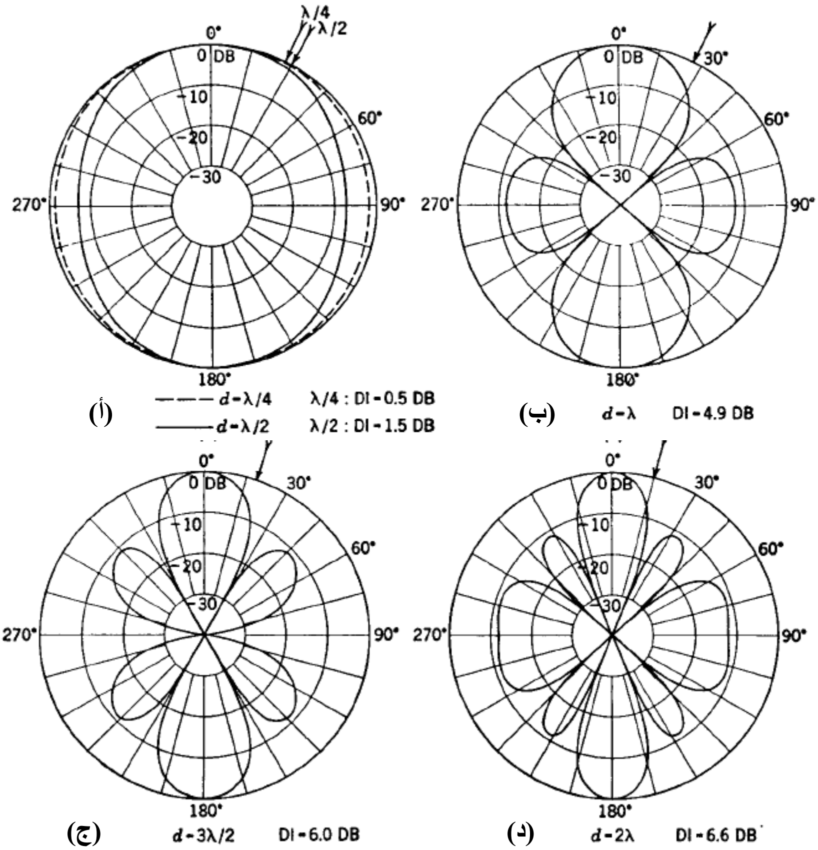
كحالة خاصة، دعنا نفترض أن عدد النقط n يصبح كبيراً جداً و أن المسافة الفاصلة b تصبح صغيرة جداً. حينئذ، كما سبق،

$$d=(n-1)b\approx nb \qquad 4\text{-}10$$

$$p=p_o\left|\frac{\sin[(\pi d/\lambda)\sin\theta]}{(\pi d/\lambda)\sin\theta}\right| \qquad 4\text{-}11$$

حيث p_o قيمة ج م م ضغط الصوت عند المسافة r من المصفوفة عند الزاوية $\theta=0$. كما ذكرنا من قبل تم افتراض أن طول المصفوفة d يكون صغيراً مقارنة مع المسافة r.

يبين الشكل 5-4 رسومات المعادلة 9-4 في حالة $n=4$ و $d=\lambda/4$، $d=\lambda/2$، $d=\lambda$، $d=3\lambda/2$، و $d=2\lambda$. يبين الشكل 6-4 رسومات مشابهه في حالة $n\to\infty$ و $b\to0$، بمعنى، تمثيل للمعادلة 11-4 في الشكل 6-4.

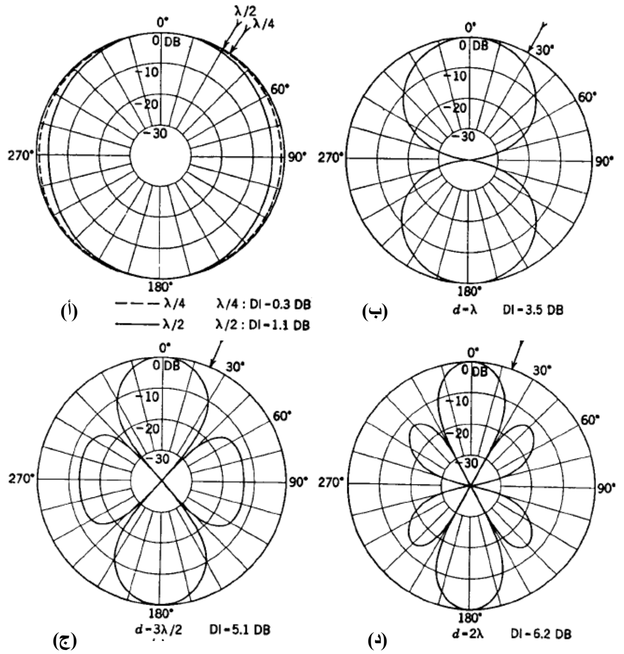


الشكل 4-5 نماذج التوجيهية لمصفوفة خطية مكونة من أربعة مصادر بسيطة في طور واحد تنفصل عن بعضها بانتظام بمسافة a على امتداد طول d . تم تدوين دليل التوجهية في كل حالة عند $\theta = 0^o$. كما تمت الإشارة إلى دليل توجهية صفرية واحد بالسهم.

الفرق الأساسى بين المعادلة 4-3، 4-5، و 4-6 لنسبة طول المصفوفة المعطاة إلى الطول الموجى هو في تخميد " الفصوص الجانبية"، بمعنى أن، ينبعث الصوت بشكل جيد في الاتجاهات $\theta = 0^o$ و $\theta = 180^o$ في كل المصفوفات الثلاثة. لكن، كلما أصبحت المصفوفة أطول وعدد العناصر أكبر، فإن الإشعاع يصبح أقل في الاتجاهات الأخرى خلاف التى توجد عند $\theta = 0^o$ و $\theta = 180^o$.

مصدر الصوت المزدوج.

مصدر الصوت المزدوج هو عبارة عن زوج من مصادر الصوت البسيطة، منفصلة عن بعضها البعض بمسافة صغيرة جداً b وتذبذبان في طور معاكس. يبين الشكل 4-7 الترتيب الهندسى لهذه الحالة. تم افتراض أن المسافة r إلى النقطة A تكون كبيرة مقارنة مع المسافة الفاصلة b بين المصدرين.



الشكل 4-6 نماذج التوجيهية لمصفوفة خطية تشع بشكل موحد على امتداد المسافة d . تم تدوين دليل التوجهية في كل حالة عند $\theta = 0^o$. كما تمت الإشارة إلى دليل توجهية صفرية واحد بالسهم.

يمكن بوضوح رؤية أن ضغط الصوت عند $\theta = 90^o$ و $\theta = 270^o$ سوف يكون صفراً، لأن مساهمة المصدرين عند تلك النقط تكون متساوية وخارج الطور بـ $\theta = 180^o$. الضغط عند $\theta = 0^o$ و $\theta = 180^o$ سوف يعتمد على نسبة b إلى الطول الموجى λ . على سبيل المثال، إذا كانت $b = \lambda$ ، فإنه سيكون لدينا ضغط صوتى يساوى الصفر عند هذه الزوايا تماماً كما فعلنا في حالة $b = \lambda/2$ للمصدرين الموجودين في طور واحد. في الحالية، يكون لدينا قيمة عظمى للضغط عند $\theta = 0^o$ و $\theta = 180^o$ في حالة $b = \lambda/2$.

لكن، الحالة المهمة عادة هى الحالة التى تكون فيها،

$$b << \lambda \qquad 4\text{-}12$$

في هذه الحالة، يمكن بيان أن ج م م الضغط المركب p_d عند النقطة A يساوى [5]،

$$p_d(r,\theta) = \frac{\rho_o\, f\, U_o\, b}{2r}(+k - j\frac{1}{r})\cos\theta\; e^{-jkr} \qquad 4\text{-}13$$

حيث U_o ج م م قوة كل مصدر بسيط (م^3/ث).

يمكن إيجاد نسبة ج م م ضغط الصوت المركب p_d المتولد بالمصدرين إلى ج م م ضغط الصوت المركب p_s المتولد بمصدر بسيط بقسمة المعادلة 4-13 على المعادلة 4-3، أي أن،

$$\frac{p_d}{p_s}=-\frac{b}{r}(1+jkr)\cos\theta \qquad 4\text{-}14$$

عندما يكون مربع المسافة r من الزوج الصوتى كبير مقارنة مع $(k^2r^2>>1)$ $\lambda^2/36$ ، فإن المعادلة 4-13 تختزل إلى الصورة،

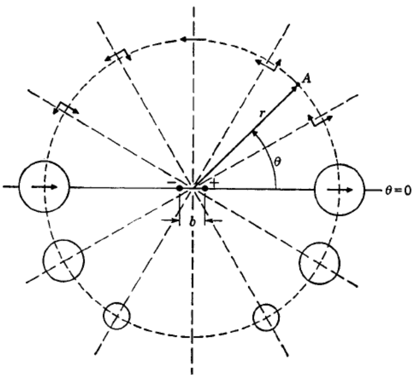
$$p_d=\frac{\rho_o\omega U_o b}{4\pi rc}\cos\theta\, e^{-jkr} \qquad 4\text{-}15$$

في هذه الحالة يتغير الضغط مع الزاوية θ كما تبين الأشكال 4-7 و 4-8. كما يتغير الضغط عكسياً مع المسافة r تماما بنفس الأسلوب كما في حالة المصدر البسيط.

بالقرب من الزوج الصوتى، عندما $r^2<<\lambda^2/36$ فإن المعادلة 4-13 تختزل إلى الصورة،

$$p_d=\frac{\rho_o\omega U_o b}{2r^2}\cos\theta\, e^{j(\pi/2-kr)} \qquad 4\text{-}16$$

في هذه الحالة، يتغير الضغط أيضاً مع $\cos\theta$ كما هو مبين بالشكل 4-8، ولكنه يتغير عكسياً مع مربع المسافة r . مازلنا نفترض أن $r>>b$.

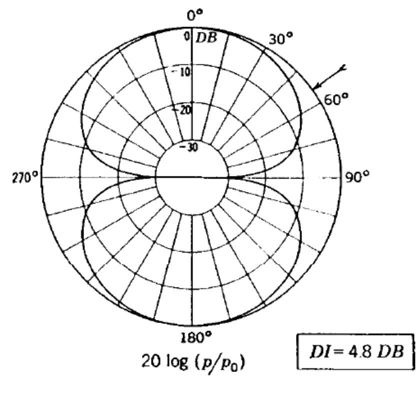


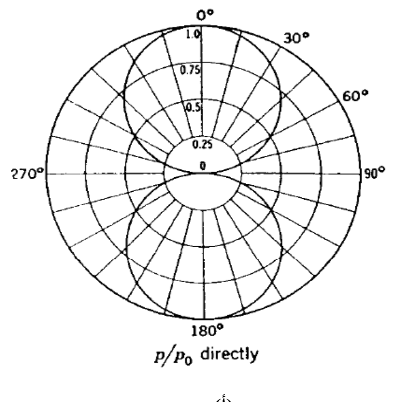
الشكل 4-7 مصدر صوتى مزدوج. يتكون هذا النوع من مصدرين بسيطين يهتزان خارج الطور بزاوية 180^o. تصنع المسافة بين المصدرين b زاوية θ مع المسافة r إلى نقطة القياس A . يبين النصف السفلى من الرسم بمساحة الدوائر مقدار ضغط الصوت كدالة في الزاوية θ . يبين النصف العلوى من الرسم تغير المركبة القطرية والمماسة لسرعة الجسيم كدالة في الزاوية θ .

المجال-القريب و المجال البعيد.

يجب أن يكون الفرق بين سلوكيات مصادر المجال-القريب والمجال البعيد دائماً حاضراً في الذهن. عند عرض نموذج التوجيهية لسماعة صوتية أو لبعض مصادر الصوت الأخرى في أى مرجع تطبيقى، يفهم دائماً أن البيانات كانت مأخوذة عند مسافة r كبيرة بدرجة كافية بالتالى يتناقص ضغط الصوت خطياً مع المسافة على امتداد الخط القطرى الواصل بين المصدرين، كما كان في حالة المعادلة 4-15. إن هذه هى حالة المجال-البعيد. ولكي تكون هذه الحالة حقيقية، يجب توفر شرطين إثنين. الأول، المسافة b للمصفوفة المشعة يجب أن تكون صغيرة مقارنة مع r و r^2 يجب كبيرة مقارنة مع $\lambda^2/36$. في مجال الصوتيات يؤخذ معامل الحجم عادة ليكون أكبر من القيمة من 3 إلى 10.

بند واحد أخر يكون مهماً فيما يتعلق بالزوج الصوتى. تتركب سرعة الجسيم من مركبتين، واحدة متجه قطريا، والأخرى تكون عمودية على تلك الاتجاه. عند $\theta = 0^0$ و $\theta = 180^0$ تكون سرعة الجسيم قطرية بالكامل (أرجع إلى الشكل 4-7). عند $\theta = 90^0$ و $\theta = 270^0$ تكون سرعة الجسيم عمودية بالكامل على الخط القطرى. بين الوضعين تتغير المركبة القطرية مع $\cos\theta$ بينما تتغير المركبة العمودية مع $\sin\theta$.





الشكل 4-8 نموذج التوجيهية لمصدر صوتى مزدوج. (أ) نسبة صوت-ضغط p/p_o مقابل θ . (ب) $20 \log p/p_o$ مقابل θ . تم تدوين دليل التوجهية في حالة عند $\theta = 0^o$. كما تمت الإشارة إلى زاوية واحدة لدليل توجهية صفرية بالسهم.

الحقيقة المثيرة هى أنه عند $\theta = 90^0$ و $\theta = 270^0$ يظهر أن مصدر الزوج الصوتى يبث موجات

صوتية مستقطبة عرضياً. لبيان ذلك، خذ سماعتين صوتيتين صغيرتين معدومة حواجز (الحاجز هو دائرة من الورق الخاص تحيط بالغشاء ذات الملف المتحرك ووظيفته تعظيم التأثير في الهواء المحيط) إلى غرفة معدومة الصدى. تكون السماعات معدومة الحواجز (محولات الطاقة) مكافئة لزوج صوتى لأن الضغط يزداد على أحد جوانب الغشاء بينما يتناقص على الجانب الأخر. ثبت السماعتين على مسافة فاصلة بينهما تساوى 0.5 متر بحيث تواجه الأغشية أرضية الغرفة (وليس بعضهما البعض). دع أحد السماعات تبث صوت ذات تردد منخفض والأخرى تعمل كميكروفون متصل ألى دخل مكبر سمعى. كما نرى من الشكل 4-7، سوف لا يتولد ضغط صوتى عند غشاء الميكروفون، لكن ستوجد هناك سرعة جسيم مستعرضة. تكون سرعة الجسيم دائما نتيجة تدرج الضغط في اتجاه السرعة. لهذا، سوف يتسبب هذا في حركة غشاء الميكروفون عندما تكون السماعتين مثبتتين كما وصف من قبل. عند دوران أحد السماعات 90^oحول المحور الواصل بينهما، فإن غشاء الميكروفون سوف لا يتحرك لأن تدرج الضغط سيكون في مستوى الغشاء. بالتالى، فإن الموجة الصوتية سوف تظهر مستقطبة استقطابا استوائيا.

أيها الطالب العزيز، لقد تعلمت الأن المبادئ الأساسية التى تحكم السمات الاتجاهية للمصادر الصوتية. سوف نكون قادرين على استعمال هذه المبادئ في فهم السلوك المقاس أو المحسوب لبعض أكثر المصادر الصوتية تعقيداً والتى توجد في مجال الصوتيات.

3-4 مصادر المكبس المستوية.

<u>المكبس الدائرى الصلب فى علبة اللانهائية</u>، Rigid Circular Piston in Infinite Baffle

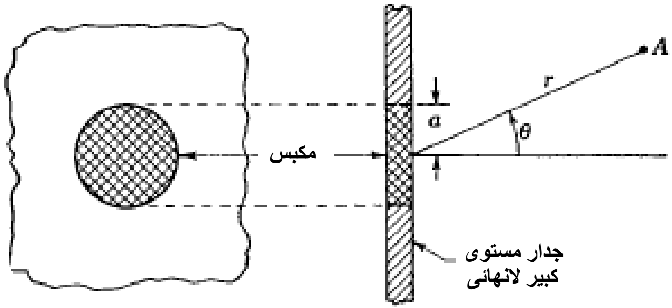
يمكن تمثيل الكثير من المصادر المشعة بالمبدأ البسيط لمكبس يهتز موضوع في جدار صلب كبير لانهائى. يفترض أن يكون المكبس صلب لكي تهتز كل أجزاء سطحه في نفس الطور وتكون سعة السرعة معتمدة على التحميل الميكانيكى أو الصوتى على سطحه المشع. عادة، يسمى الجدار الصلب المحيط بالمكبس بالحاجز، والذى يكون من التعريف عبارة عن بناء حجب أو حاجز يستخدم لزيادة الطول الفعال لمسار الانتقال الخارجى بين جبهة و ظهر السطح المشع.

يبين الشكل 4-9 الشكل الهندسى للمشكلة. نريد أن نعرف ضغط الصوت عند النقطة A الموجودة عند مسافة r وبزاوية θ مع مركز المكبس. لعمل ذلك، نقوم بتقسيم سطح المكبس إلى عدد صغير من العناصر، يعمل كل منهم كمصدر بسيط يهتز في نفس الطور مع العناصر الأخرى. حينئذ، يكون الضغط عند النقطة A هو مجموع مقادير واتجاه الضغوط من هذه العناصر الأولية.

يظهر هذا المجموع في الكثير من الكتب[6] و، في حالة أن r تكون كبيرة مقارنة مع نصف قطر المكبس a، يعطى المعادلة،

$$p(r,t) = \frac{\sqrt{2}\, j\, f\, \rho_o\, u_o\, \pi\, a^2}{r} \left[\frac{2J_1(ka\sin\theta)}{ka\sin\theta} \right] e^{j\omega(t-r/c)} \qquad 4\text{-}17$$

حيث u_o ج م م سرعة المكبس، $J_1(\ \ )$ دالة بيسل من الرتبة الأولى للمحاور الأسطوانية [6].



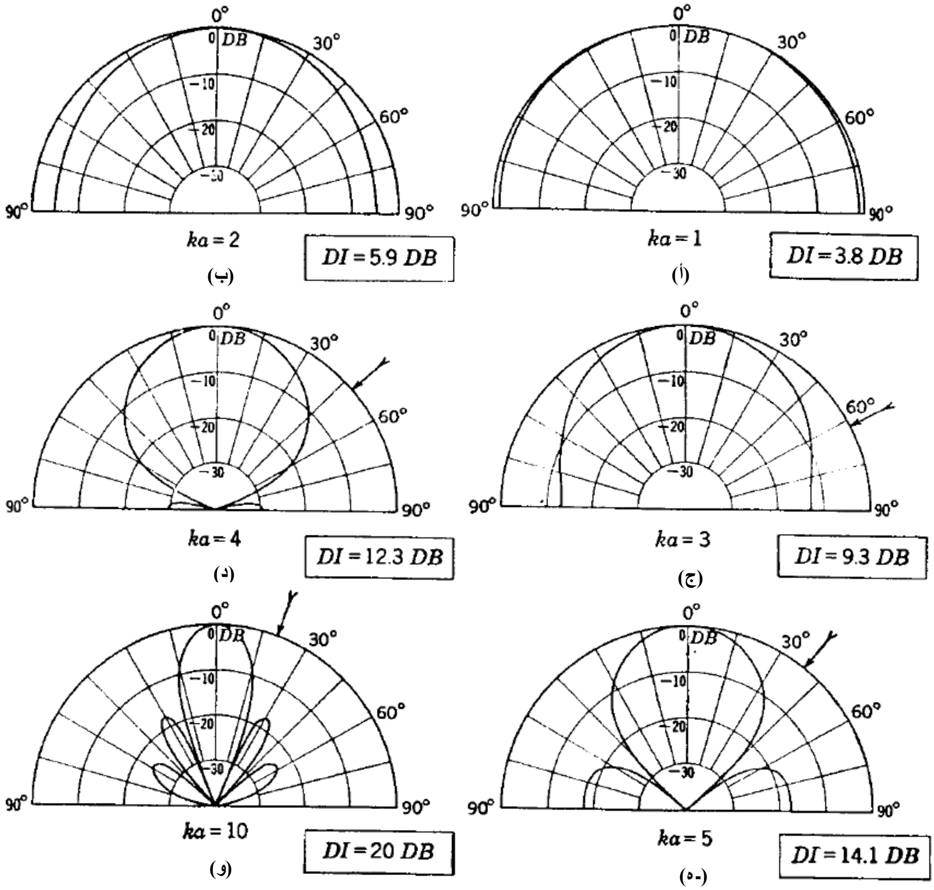
الشكل 4-9 مكبس دائرى صلب في علبة صلبة. تقع نقطة القياس A عند مسافة r بزاوية θ بالنسبة لمركز المكبس.

يعطى جزء المعادلة 4-17 الموجود بين الأقواس نموذج التوجيهية ويتم رسمه بالديسيبل كدالة في θ في الشكل 4-10 لستة قيم لـ $ka = 2\pi a/\lambda$، بمعنى، لستة قيم للنسبة بين محيط المكبس والطول الموجى.

عندما يكون محيط المكبس ($2\pi a$) أقل من نصف الطول الموجى، أى $ka < 0.5$، فإن المكبس يسلك في الأساس مثل مصدر نقطى. عندما يصبح ka أكبر من 3، فإن المكبس يكون موجهاً بشكل قوى. نرى من الشكل 4-24 أن السماعة الصوتية المعتادة تصبح أيضاً موجهة نسبياً عند الترددات العالية بشكل يماثل كثيراً نفس سلوك المكبس المتذبذب.

مكبس أسطوانى صلب فى نهاية أنبوبة طويلة.[7]

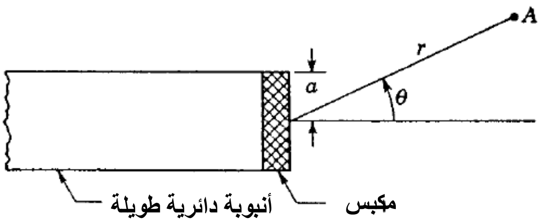
في الكثير من الحالات، ينبعث الصوت من غشاء يكون جانبه الخلفي محجوب عن الجانب الأمامى بواسطة حاجز أو أنبوبة. إذا كان الحاجز لا يمتد بشكل كبير بعد حواف الغشاء الأساسى، فإنه يمكن تخمين أدائه عن طريق المقارنة مع تلك الذي له مكبس صلب موضوع عند نهاية الأنبوبة الطويلة.



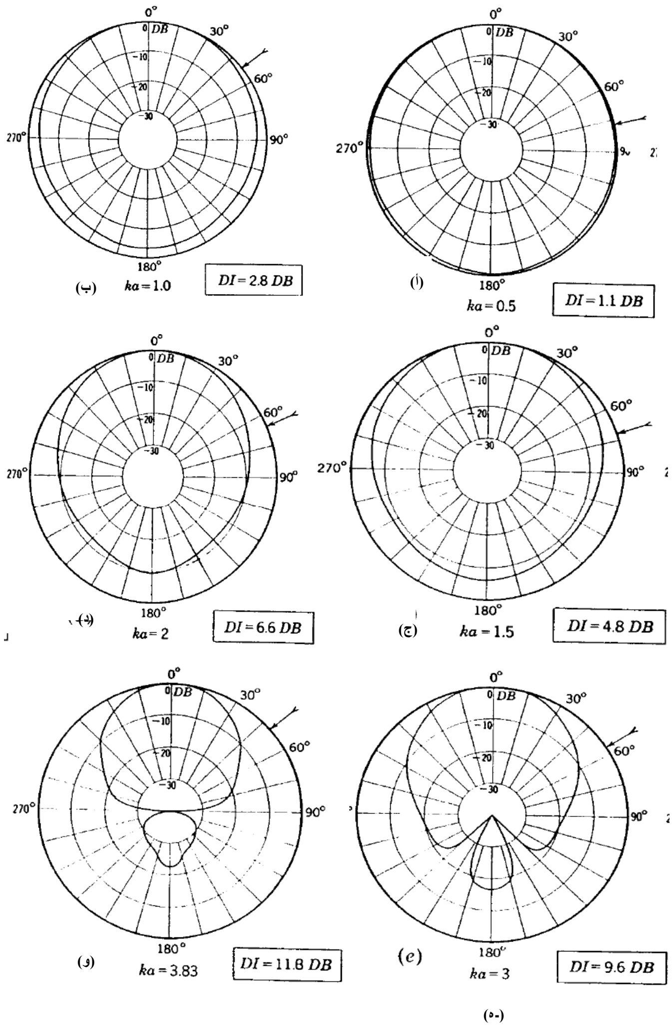
الشكل 4-10 نماذج التوجيهية لمكبس دائرى صلب في جدار لانهائى كدالة في $ka = 2\pi a/\lambda$ حيث a نصف قطر المكبس. تم تدوين أيضا دليل التوجهية في حالة $\theta = 0^o$. d . كما تمت الإشارة إلى دليل التوجهية الصفرى بالسهم. لا تصبح DI أبداً أقل من 3 ديسيبيل لأن المكبس يبث فقط في نصف-الفضاء.

يبين الشكل 4-11 الحالة الهندسية للمكبس المذكور. مرة أخرى، يتعين الضغط عند A بجمع الضغوط من عدد صغير من عناصر سطح المكبس، والتى يعمل كل منها كمصدر بسيط. لكن، يكون حل هذه المسألة معقدا، وذلك لأن الإشعاع يمكن أن يحدث في كل الاتجاهات والصوت يجب أن يتشتت حول حافة الأنبوبة لنحصل على الجزء الموجود على اليد اليسرى من الفضاء (الشكل 4-11). بالتالى، يجب استخدام النظرية التى تتضمن تأثيرات التشتت في حل المسألة تحليلياً.

تم بيان النتائج التى تم الحصول عليها من هذه النظرية في الشكل 4-12 لستة قيم للمقدار ka . هنا، تم افتراض أن المسافة r كبيرة مقارنة مع a ، بالتالى فإن نموذج التوجيهية يصلح (ينطبق) للمجال-البعيد.



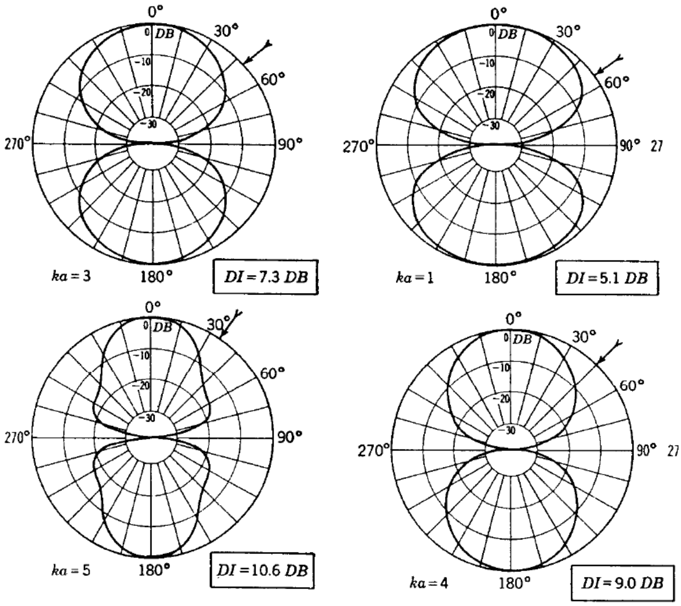
الشكل 4-11 مكبس دائرى صلب في نهاية أنبوبة طويلة. تقع نقطة القياس A **عند مسافة** r **بزاوية** θ **بالنسبة لمركز المكبس.**



الشكل 4-12 -نماذج التوجيهية لمكبس دائرى صلب في نهاية أنبوبة طويلة كدالة في $ka = 2\pi a/\lambda$ **حيث** a **نصف قطر المكبس.** تم تدوين أيضا دليل التوجهية في حالة $\theta = 0^o$. **كما تمت الإشارة إلى دليل** توجهية الصفرى.

مكبس دائرى صلب بدون حاجز[8]

لكى نكمل المكابس الشائعة الاستخدام، نعرض النتائج النظرية للدراسات على نموذج التوجيهية لمكبس صلب له نصف قطر a بدون أى حاجز الذى يشع في الفضاء الحر. يبين الشكل 4-13 بيانياً هذه النتائج لأربعة من قيم ka. من الشيق ملاحظة التشابه بين هذه المنحنيات والمنحنيات الصوتية للزوج الصوتى. في الحقيقة، وعند التقريب الأولى، يكون المكبس الرقيق المعدوم الحاجز زوج صوتى بسيط، لأن الحركة المحورية في اتجاه واحد تضغط الهواء على أحد جانبيه وتسبب تخلخل الهواء على الجانب الأخر.



الشكل 4-13 نماذج التوجيهية لمكبس دائرى صلب بدون حاجز له نصف قطر a موضوع في الفضاء الحر عند مسافة كبيرة r بزاوية θ من نقطة القياس A. في حالة $ka < 1$ يكون نموذج التوجيهية مثل حالة المصدر المزدوج. تم تدوين أيضا دليل التوجهية في حالة $\theta = 0^o$. كما تمت الإشارة إلى دليل توجهية صفرى واحد بواسطة سهم.

مصادر المكبس المربعة والمستطيلة [9].

مكبس مربع صلب فى حاجز لانهائى.

هذا النوع من المصادر المشعة ليس شائعاً بشكل كبير في مجال الصوتيات. يكفي القول هنا بأن نموذج التوجيهية لذلك المكبس في مستوى عمودى على المكبس وموازى للجانب يكون مماثلاً لنموذج توجيهية للمصفوفة الخطية من المصادر البسيطة المعطاة بالمعادلة 4-11. النموذج في مستوى يوازى

أى من القطرين يختلف اختلافا طفيفاً عن تلك الموجود في مستوى يوازى جانب.

مكبس مستطيل صلب في حاجز لانهائى.

تعطى نماذج التوجيهية لهذا النوع من المصادر المشعة والذى له أبعاد d_1 و d_2 بالمعادلة،

$$\text{Directivity pattern} = \left| \frac{\sin\left[(\pi d_1/\lambda)\sin\theta_1\right]}{(\pi d_1/\lambda)\sin\theta_1} \frac{\sin\left[(\pi d_2/\lambda)\sin\theta_2\right]}{(\pi d_2/\lambda)\sin\theta_2} \right| \qquad 4\text{-}18$$

حيث θ_1 الزاوية بين العمودى على سطح المكبس ومسقط الخط الواصل بين منتصف السطح ونقطة الملاحظة على مستوى عمودى على السطح وموازياً لـ d_1. θ_2 مثل θ_1 مع استبدال d_1 بـ d_2.

لاحظ أن نموذج التوجيهية يساوى حاصل ضرب نماذج التوجيهية لمصفوفتين خطيتين متعامدتين على بعضهما البعض (ارجع الى المعادلة 4-11).

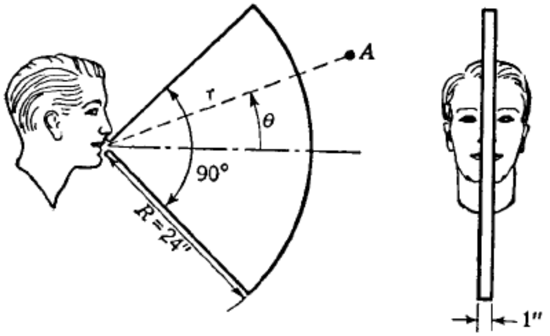
4-4 المصادر المقوسة [10].

في الفقرات السابقة من هذا الجزء تناولنا إشعاع الصوت من مصفوفات الخط - المستقيم ومصفوفات السطح – المستوى. هذه الأنواع من المصفوفات تكون قريبة الشبه من أنابيب الأرغن المفتوحة النهاية، السماعات الصوتية ذات البث – المباشر، الأبواق البسيطة، وأجهزة أخرى. السمة المشتركة بين كل هذه المصفوفات (ما عدا مصفوفة الزوج) هى أنها تصبح أكثر توجيهية كلما أصبحت نسب أطوالها إلى الطول الموجى أكبر. هذه السمة تكون غير مرغوبة في العادة في السماعات الصوتية لأن هذا يعني أن طيف الموسيقى أو الخطاب المتولد سيتفاوت من موقع إلى آخر حول السماعة.

للتغلب (بشكل جزئى) على هذه الزيادة في التوجيهية مع زيادة التردد، شاع استعمال مشعات صوتية مقوسة السطح. يمكن صنع هذه السطوح من عدد صغير من السماعات الصغيرة أو الأبواق الصغيرة أو الأبواق المضخمة (megaphone) ذات الأسطح المقوسة.

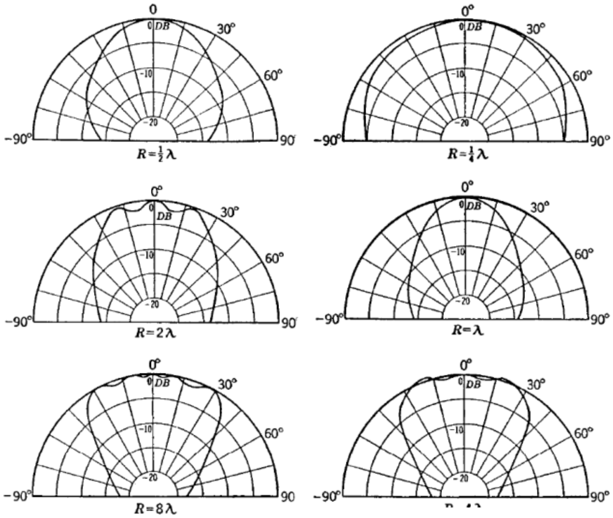
مصدر الخط – المقوس (البوق المضخم البيضاوى)

البوق المضخم البيضاوى هو مثال مصدر الخط – المنحنى، كما هو مبين في الشكل 4-14. يجب أن تكون فتحة البوق المضخم رفيعة بما يكفي (1 بوصة) لكى يكافئ بشكل تقريبى مصدر صوت خطى له تردد أقل من 4000 هيرتز. يكون البوق بيضاوى لأن مساحة المقطع يتناسب مع المسافة من القمة.



الشكل 4-14 بوق مضخم بيضاوى مناسب لاستعمال قائد المشجعين في إستاد كرة القدم.

يتم إيجاد ضغط الصوت عند النقطة A الموجودة على مسافة r من قمة البوق عن طريق جمع الضغوط بالسعة والطور المتولدة من الخط المقوس المفترض المكون للمصادر البسيطة. عندما تكون المسافة r كبيرة مقارنة مع نصف القطر R للبوق، نحصل على نماذج التوجيهية المبينة في الشكل 4-15.

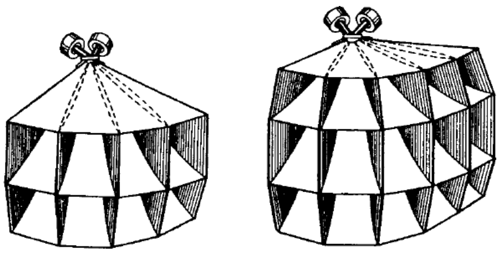


الشكل 4-15 نماذج التوجيهية للبوق المضخم البيضاوى الموجود في الشكل 4-14 في المستوى الذى يحتوى على قوس الفتحة.

توضح هذه الحالة البسيطة المبادئ الأساسية الملائم لكل المصادر المشعة المقوسة. عند الترددات المنخفضة يكون المصدر المقوس غير موجهاً بشكل كبير. عند زيادة التردد يصبح المصدر أكثر توجيهية، محققاً أقل زاوية انتشار له عندما يكون وتر المصدر المقوس مساوياً تقريباً للطول الموجى. عند الترددات العالية، تصبح نماذج التوجيهية أوسع، وتصل لأقصى عرض لها عندما تصبح مساوية لعرض القوس معبر عنه بالدرجات، على سبيل المثال، 90^o في الشكل 4-14.

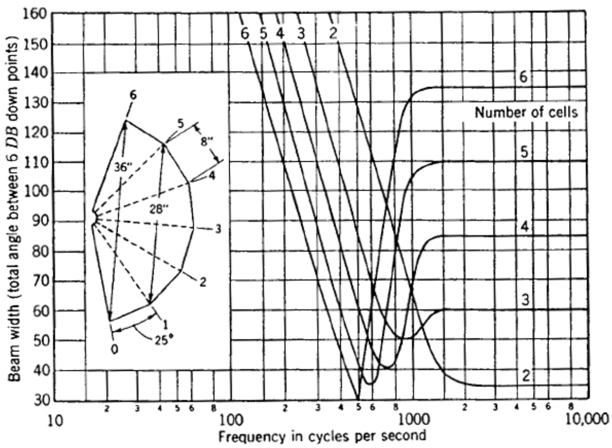
مصادر الأسطح المقوسة (الأبواق المتعددة الخلايا)

أغلب مصادر الأسطح المقوسة الموجودة في مجال الصوتيات في الوقت الحاضر عبارة عن أبواق متعددة الخلايا. يبين الشكل 4-16 مثالين نموذجيين لهذه الأبواق المتعددة الخلايا.



الشكل 4-16 أبواق متعددة الخلايا بجبهات إشعاع مقوسة. (أ) $3\times5=15$ خلية، (ب) $2\times4=8$ خلايا.

تم تعريف عرض شعاع نموذج التوجيهية على أنه المسافة الزاوية بين النقطتين الموجودتين على جانبي المحور الرئيسي حيث يكون ضغط الصوت عندهما أقل من قيمته عند $\theta=0$ بمقدار 6 ديسيبل[11]. تم قياس عرض شريط نماذج التوجيهية في حالة عرض واحد، ثلاثة، أربعة، وخمسة عروض لأبواق متعددة الخلايا بوحدات تجارية، كما يبين الشكل 4-17. تكون هذه البيانات مفيدة عند تصميم الأنظمة الصوتية.



الشكل 4-17 عروض الشعاع لأبواق متعددة تم بنائها كما بالشكل 4-16.

يجب ملاحظة أن أقل عرض شعاع يحدث عندما يكون قوس البوق المتعدد الخلايا يساوى λ تقريباً. أيضاً، عند الترددات العالية يصل عرض الشعاع حوالى $n.25^{o}-15^{o}$ لحجم الخلية المبين في الشكل

17-4. يتم ايجاد معاملات التوجيهية النظرية لأقصى عروض الأشعة هذه من المخطط البيانى المبين في الشكل 4-22، والذي يستند على المخطط المبين في الشكل 4-21.

الجزء الحادى عشر – دليل ومعامل التوجيهية

تكون مخططات نماذج توجيهية المصادر الصوتية كافية في الكثير من الحالات، مثل عندما يكون المصدر موضوع في الخارج (في الهواء الطلق) على مسافة من الأسطح العاكسة. في الداخل، يكون ضرورى معرفة بعض المعلومات عن القوة الكلية التي تنبعث من المصدر لكي يتم حساب تأثير تقوية الانعكاس في الغرفة على خرج المصدر الصوتى. يتم حساب عدد عند كل تردد وهذا العدد يخبر عن درجة التوجيهية دون الحاجة إلى عرض نموذج التوجيهية بالكامل. هذا العدد هو معامل التوجيهية، أو عند التعبير عنه بوحدات الديسيبل يسمى دليل التوجيهية.

5-4 معامل التوجيهية، $Q(f)$ Directivity factor.

معامل (دليل) التوجيهية هو النسبة بين الشدة على المحور المعين للصوت عند المسافة المذكورة r و الشدة التى سوف تتولد عند نفس المكان بواسطة مصدر نقطى يشع نفس القدرة الصوتية الكلية للمشعاع. عادة، يؤخذ المحور المعين كمحور أقصى إشعاع، وهى الحالة التى فيها $Q(f)$ تزيد عن الوحدة دائما. في بعض الحالات، يكون مطلوب معامل التوجيهية لمحاور أخرى، حيث $Q(f)$ قد تفترض أن تساوى أو تكون أكبر من قيمة الصفر.

6-4 دليل التوجيهية $\mathrm{DI}(f)$ Directivity Index

دليل التوجيهية هو 10 أمثال اللوغاريتم للأساس 10 لمعامل التوجيهية، أى أن،

$$\mathrm{DI}(f) = 10\log_{10} Q(f) \qquad 4\text{-}19$$

7-4 حساب $Q(f)$ و $\mathrm{DI}(f)$

تتعين الشدة I عند نقطة تبعد مسافة r عن المركز الصوتى لمصدر الصوت الموضوع في الفضاء الحر بقياس ضغط الصوت الفعال p اولاً ثم وضع $I = |p|^2/\rho_o c$. (جاء هذا التعبير الرياضى من تعريف شدة الموجة المستوية أو الكروية السابق ذكره)

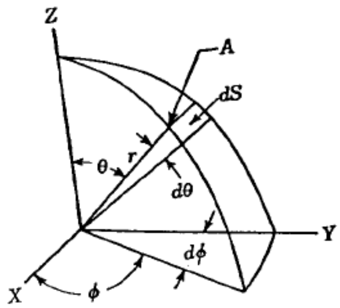
إذا كان المصدر عبارة عن مصدر نقطتى بالتالى لا تكون I دالة في θ وموضوع في الفضاء الحر، فإن القدرة الصوتية الكلية المنبعثة تكون على الصورة،

$$W_p = 4\pi r^2 I$$

إذا لم يكن المصدر مصدر نقطى، فإن القدرة الصوتية الكلية المنبعثة تتعين بمجموع الشدات على سطح كرة لها نصف قطر r . بمعنى تكون القدرة الكلية المنبعثة على الصورة،

$$W = \frac{r^2}{\rho_o c} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} p^2(\theta,\phi,r) \sin\theta \, d\theta \, d\phi \qquad 4\text{-}20$$

حيث يعطى الإحداثى عند أى نقطة في الفضاء بواسطة الزوايا θو ϕونصف القطر r (ارجع للشكل 18-4) و $p^2(\theta,\phi,r)$ تساوى متوسط مربعات ضغط الصوت عند النقطة المحددة بواسطة θو ϕو r.



الشكل 4-18 نظام محاور يعرف الزاوية θ و ϕ والطول r للخط الواصل بين النقطة A و مركز الكرة. مساحة عنصر السطح $dS = r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi$.

عادة لا يوجد تعبير تحليلي للدالة $p(\theta,\phi)$. لهذا، في الواقع العملى، يتم أخذ البيانات عند مراكز عدد من المساحات، تتساوى تقريباً في المقدار، على سطح كرة تحيط بالمصدر نصف قطرها r . على سبيل المثال، نرى في الشكل 4-19أ سطح كروي مقسم إلى 20 جزء متساوى لها نفس الشكل. بفرض أن شدة الصوت على كل من هذه الأجزاء هى I_1 ، I_2 ، I_3 ،.. إلخ، فإن القدرة الكلية المنبعثة W تكون على الصورة،

$$W = I_1 S_1 + I_2 S_2 + ... + I_{20} S_{20} \qquad 4\text{-}21$$

حيث S_1 ، S_2 ، ....، S_{20} هى مساحات الأجزاء الـ 20 للسطح الكروى. إذا كان السطح مقسم إلى 20 جزء متساوية (كما يبين الشكل 4-19أ، فإن $S_1 = S_2 = S_3 = ... = S_{20}$. في الحالات الأبسط، يمكن تقسيم السطح الكروى إلى 16 جزء تكون متساوية في المساحة لكن ذات أشكال مختلفة،

وكما يمكن أن نرى من الشكل 4-19ب و ج.

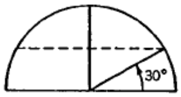
من التعريف يكون معامل التوجيهية $Q(f)$ على الصورة،

$$Q(f)=\frac{|p_{ax}|^2}{\rho_o c}\,\frac{4\pi r^2}{W}=\frac{4\pi|p_{ax}|^2}{\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}|p(\theta,\phi)|^2\sin\theta\, d\theta\, d\phi} \qquad 4\text{-}22$$

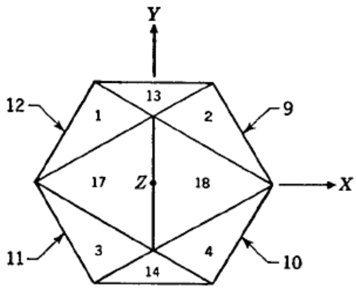
حيث $|p_{ax}|^2$ هى قيمة متوسط مربعات ضغط الصوت على المحور المحدد عند مسافة معينة r (ارجع للشكل 4-23، المحور 0^o على سبيل المثال)

أرقام القطاع	الإحداثيات X	Y	Z
1-8	$\pm 1/\sqrt{3}$	$\pm 1/\sqrt{3}$	$\pm 1/\sqrt{3}$
9-12	±0.934	±0.357	0
13-16	0	±0.934	±0.357
17-20	±0.357	0	±0.934

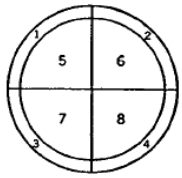
إحداثيات النقط المتوسطة للقطاعات



منظر الإرتفاع
(ب)



منظر من قمة الكرة
(أ)



منظر مستوى
(ج)

الشكل 4-19 (أ) تقسيم سطح الكرة إلى 20 من المساحات المتساوية لها نفس الشكل. (ب) و (ج)) تقسيم سطح نصف الكرة إلى 8 أجزاء متساوية المساحة ومختلفة الشكل.

في الحالة الخاصة حيث لا يعتمد ضغط الصوت المتولد بواسطة المصدر عند إى قيمة معينة لـ θ على قيمة الزاوية ϕ، بمعنى حيثما يوجد محور تماثل، فإن المعادلة 4-22 يمكن أن تبسط إلى الصورة،

$$Q(f)=\frac{4\pi\, p_{ax}^{\;2}}{2\pi\int_0^{\pi} p^2(\theta)\sin\theta\, d\theta} \qquad 4\text{-}23$$

من أجل التبسيط تم التخلى عن إشارات المقدار.

يكون الكثير من المصادر، مثل السماعات الصوتية، متماثلة بحق حول المحور الرئيسى بحيث تنطبق المعادلة 4-23. في هذه الحالة، يتم أخذ البيانات بشكل عام عند عدد من النقاط لها زوايا θ_n تقع في مستوى أفقى حول المصدر بالتالى فإن،

$$Q(f) = \frac{(4\pi\, p_{ax}^{\;2})(57.3)}{2\pi \displaystyle\int_{n=1}^{180^o/\Delta\theta} p^{\,2}(\theta_n)\,\sin\theta_n\;\Delta\,\theta} \qquad 4\text{-}24$$

حيث $\Delta\theta$ الفرق بالدرجات بين النقط المتتالية حول المصدر الصوتى التى يتم قياس $p(\theta_n)$ عندها (أرجع للشكل 4-23 على سبيل المثال) . $180^o/\Delta\theta$ هو عدد القياسات التى يتم عملها مرور من النقطة الموجودة عند مقدمة المصدر مباشرة إلى النقطة الموجودة خلفه مباشرة (أى من 0^o إلى 180^o). تم افتراض أن المصدر الصوتى متماثل بحيث يكون التغير بين 360^o و 180^o كما هو بين 0^o و 180^o.

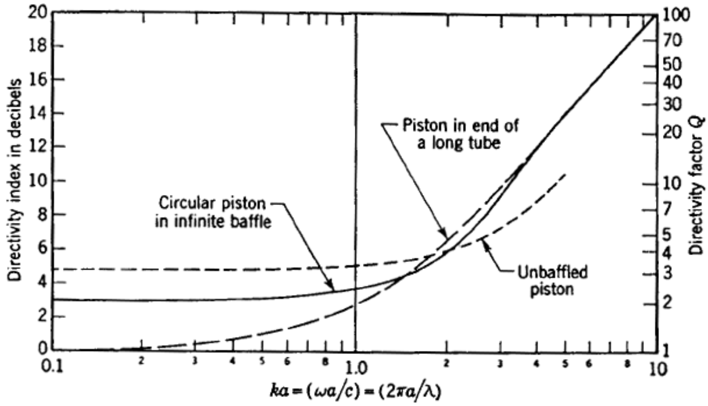
إذا كان المصدر مثبت في حاجز لانهائى، يكون القياس ممكن فقط في نصف كرة. لهذا السبب فإن قيمة n في المعادلة 4-23 تتغير من 1 إلى $90^o/\Delta\theta$. إذا كان المصدر في الحاجز اللانهائى غير موجهه في نصف كرة، وهى الحالة التى تكون عادة عند $ka < 0.5$، حينئذ فإن معامل التوجيهية $Q = Q_\lambda = 2$، بمعنى أن $\mathrm{DI} = 3\mathrm{db}$.

إذا كان نموذج التوجيهية غير متماثل تقريباً، حينئذ فإن المعامل 4 في بسط المعادلة 4-23 يصبح 8 وتتغير قيمة n من 1 إلى $\dfrac{360^o}{\Delta\theta}$. هذا، في الواقع، يتوسط جانبى نموذج التوجيهية.

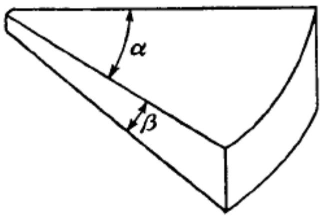
يكتب دليل التوجيهية عند $\theta = 0^o$ لكل نموذج توجهية مبين في الجزء العاشر وفي هذا الجزء بجانب كل نموذج توجهية.

يكون المحور المرجعى هو المحور الرئيسى عند $\theta = 0^o$ في كل حالة. يتم تعليم (ترقيم) الزاوية θ التى عندها دليل التوجيهية يساوى $0\mathrm{db}$ في هذه الرسوم. حينئذ، يمكن إيجاد دليل التوجيهية عند أى زاوية أخرى θ عن طريق طرح قيمة الديسيبل لذلك المحور من قيمة الديسيبل عند المحور الذى عنده يكون $\mathrm{DI} = 0$.

في حالة المرجع السهل، يبين الشكل 4-20 أدلة التوجيهية لمكبس في (1) حاجز مستوى لانهائى، (2) أنبوبة طويلة، و (3) في الفضاء الحر مرسومة كدالة في ka.



الشكل 4-20 أدلة التوجيهية للإشعاع من (1) جانب واحد فقط لمكبس في حاجز مستوى لانهائى، (2) مكبس في نهاية أنبوبة طويلة، و (3) مكبس في فضاء حر بدون أى حاجز.

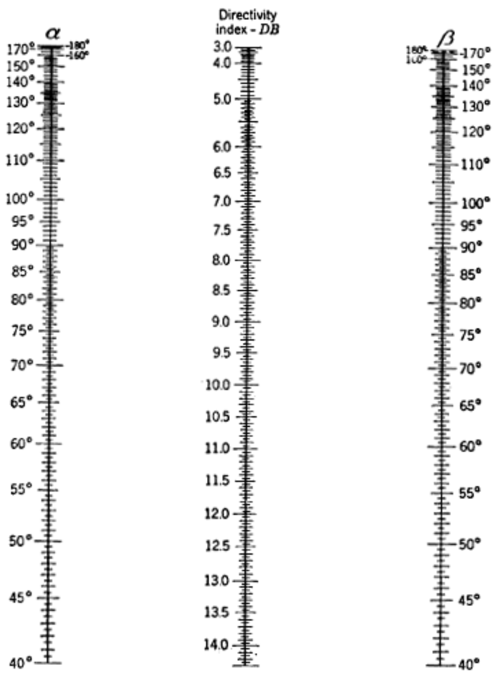


الشكل 4-21 الإشعاع في قمع مستطيل صلب من الفضاء معرف بالزوايا α و β.

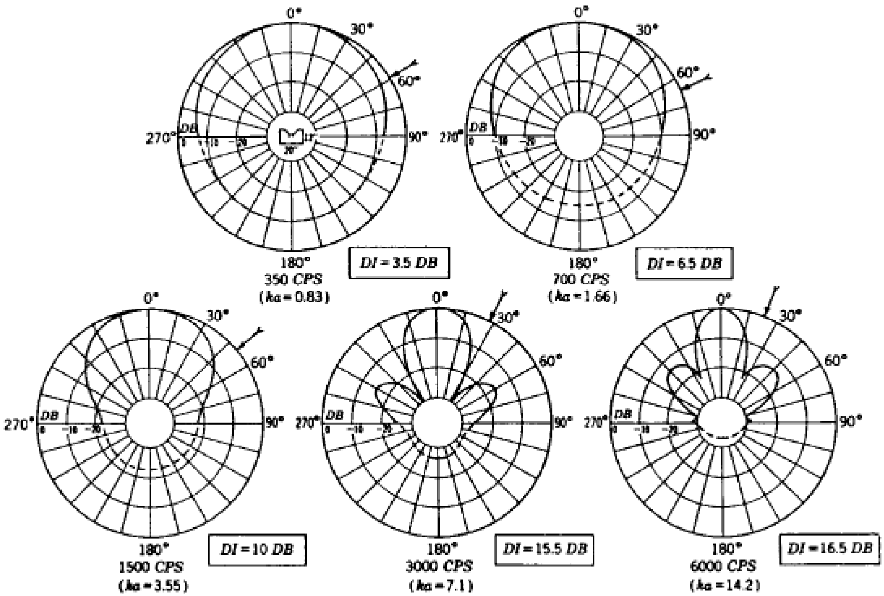
الكثير من سماعات الأبواق عند الترددات العالية (فوق 1500 هيرتز) تشع الصوت بشكل منتظم في قمع مستطيل صلب من الفضاء كالمبين في الشكل 4-21. هذه الأبواق تكون من النوع الذى تم مناقشته في الجزء 4-4. يمكن تقدير أدلة التوجيهية في مدى تردد أعلى من 1500 هيرتز كدالة في α و β بمساعدة الرسم البياني المبين في الشكل 4-22[12].

يبين الجدول 4-1 الحسابات التفصيلية لسماعة صوتية معبأة في صندوق ولها نموذج توجيهية عند تردد 1500 هيرتز المبين في الشكل 4-23. لا يكون الجانب اليسار (L) والجانب اليمن (R) من المميزة التوجيهية متشابهان، لذلك يتم استخدام عملية المتوسط المذكورة في الفقرة السابقة.

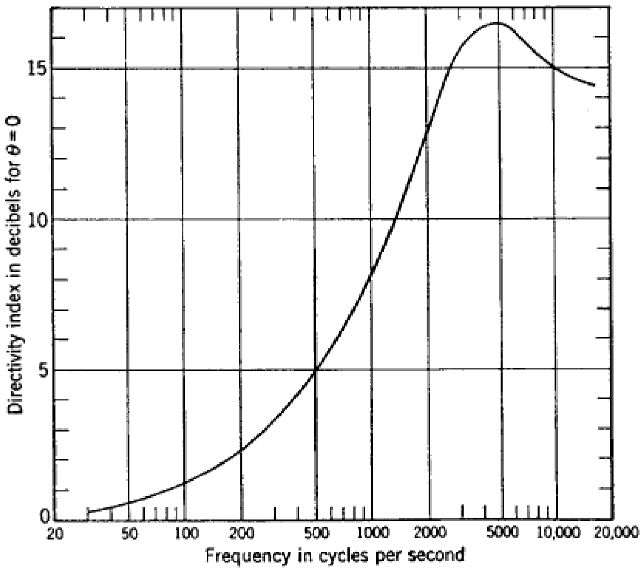
بعد حساب معامل التوجيهية لكل تردد، يتم رسم دليل التوجيهية $\mathrm{DI}(f)$ بالديسيبل الذى يتم حسابه بواسطة المعادلة 4-19. في حالة السماعة التى لها نماذج التوجيهية المبينة في الشكل 4-23 فإن دليل التوجيهية كدالة في التردد يكون كما هو مبين في الشكل 4-24.



الشكل 4-22 مخطط بيانى لتعيين أدلة التوجيهية لمصدر صوتى يشع بشكل منتظم في فضاء على شكل قمع صلب من النوع المبين في الشكل 4-21 [12].



الشكل 4-23 نماذج التوجيهية لسماعة صوتية بمشعاع مباشر 12 بوصة في صندوق مستطيل $27\times20\times12\text{in}$. المربعات تعطى دليل التوجيهية عند $\theta = 0^o$. تم بيان دليل توجيهية لزاوية صفرية واحدة.



الشكل 4-24 أدلة التوجيهية لمحور 0^o لنماذج التوجيهية المبينة في الشكل 4-23 محسوبة على أساس أن المصدر متماثل حول محور 0^o . البيانات مطبقة على سماعة صوتية بمشعاع مباشر 12 بوصة في صندوق مستطيل $12\times 20\times 27$ بوصة.

الجدول 4-1 حساب دليل التوجيهية $\mathrm{DI}(f)$ [13].

θ_n		$\sin\theta_n$	Directivity		$\left\lvert \frac{p(\theta_n)}{p_{ax}} \right\rvert^2$		$\left\lvert \frac{p(\theta_n)}{p_{ax}} \right\rvert^2 \sin\theta_n$	
L	R		L, db	R, db	L	R	L	R
355	5	0.087	0	−0.2	1.00	0.95	0.09	0.08
345	15	0.259	0	−1.0	1.00	0.79	0.26	0.21
335	25	0.423	−1.5	−3.0	0.71	0.50	0.30	0.21
325	35	0.574	−3.5	−6.0	0.45	0.25	0.26	0.14
315	45	0.707	−5.7	−10.0	0.27	0.10	0.19	0.07
305	55	0.819	−8.6	−14.5	0.14	0.04	0.11	0.03
295	65	0.906	−11.7	−18.5	0.07	0.01	0.06	0.01
285	75	0.966	−15.4	−22.3	0.03	0.01	0.03	0.01
275	85	0.996	−18.4	−23	0.01	0.01	0.01	0.01
265	95	0.996	−20	−20	0.01	0.01	0.01	0.01
255	105	0.966	−20	−20	0.01	0.01	0.01	0.01
245	115	0.906	−20	−20	0.01	0.01	0.01	0.01
235	125	0.819	−20	−20	0.01	0.01	0.01	0.01
225	135	0.707	−20	−20	0.01	0.01	0.01	0.01
215	145	0.574	−20	−20	0.01	0.01	0.01	0.01
205	155	0.423	−20	−20	0.01	0.01	0.00	0.00
195	165	0.259	−20	−20	0.01	0.01	0.00	0.00
185	175	0.087	−20	−20	0.01	0.01	0.00	0.00
							1.37	0.83

$$Q(f)=\frac{8\pi\times 57.3^{o}}{2\pi\sum_{1}^{36}\left|\frac{p(\theta_n)}{p_{ax}}\right|^{2}\sin\theta_n\times 10^{o}}=\frac{23}{1.37+0.83}=10.4$$

$$\mathrm{DI}(f)=10\log 10.4=10.2\ \text{db}$$

مراجع هذا الباب

1- P. M. Morse, 'Vibration of Sound," 2nd ed., pp. 311-326, McGraw-Hill Book Company, Inc, New York, 1948.

2- - L.E. Kinsler and R. Frey, "Fundamental of Acoustic," pp. 167-169, John Wiley & Sons, Inc., 1950.

3- P. M. Morse, 'Vibration of Sound," 2nd ed., pp. 312-313, McGraw-Hill Book Company, Inc, New York, 1948.

4- H. F. Olson, "Elements of Acoustical Engineering," 2nd ed. pp 31-34 D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1947.

5- L.E. Kinsler and R. Frey, "Fundamental of Acoustic," pp. 280-185, John Wiley & Sons, Inc., 1950.

6- P. M. Morse, 'Vibration of Sound," 2nd ed., pp. 326-346, McGraw-Hill Book Company, Inc, New York, 1948, A table of Bessel functions is given on page 444.

7- H. Levine and J. Schwinger, On the Radiation of Sound from an Unflanged Circular Pipe, Phys. Rev., 73, 383-406, (Feb. 15 1948).

8- F. M. Wiener, On the Relation between the Sound Fields Radiated and Diffracted by Plane Obstacles, J. Acoust. Soc. Amer. , 23: 697-700 (1951).

9- H. F. Olson, "Elements of Acoustical Engineering," 2nd ed. pp 39-40 D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1947.

10- نفس المرجع السابق صفحة 40-47.

11- لم يتم اختيار أى قيم قياسية لعدد الديسيبل الأقل من قيمة ضغط الصوت عند $\theta=0$ في تعيين عرض الشريط. تصادف القيم 3، 6، و 10 عادة في المراجع العلمية.

12- C. T. Molloy, Calculation of the Directivity Index for Various Types of Radiators, J. Acoust. Soc. Amer., 20: 387-405 (1948).

13- عند $f=1500$ cps للسماعات التجارية المتوفرة التى لها نماذج التوجيهية المبينة في الشكل 23-4. الكمية $\Delta\theta=10^{o}=\pi/18$ radians.

الباب الخامس

المكونات الصوتية

ACOUSTIC COMPONENTS

الجزء الثانى عشر - معاوقات الاشعاع

كان التطور السريع لمجالات الراديو والتليفزيون نتيجة توفر المكونات الكهربية ذات الخصائص الفيزيائية المعروفة جيدا، هذا بالإضافة إلى بساطة تجميعها فى آلية متكاملة. مع مثل هذه المكونات (مقاومات، مكثفات، وملفات حثية) فإن مهندس البحث المتقدم وطالب المدرسة العليا على حد سواء يكونوا قادرين على التجريب بالدوائر الجديدة. غالباً، يمكن تصميم أجهزة معقدة مثل مرشحات الموجة – الكهربية بالاختيار من بين الأجزاء المتوفرة بسهولة حتى يتم تحقيق الأداء المطلوب – الذي بخلاف ذلك قد يتطلّب تحليل رياضي طويل.

لا توجد مثل تلك الحالة المرضية فى مجال الصوتيات، لإن العناصر الصوتية غير متوفرة بعد تجارياً. فى أغلب الأحيان، واكبت الكتب الدراسية المتقدمة المعالجة النظرية لأداء العناصر الصوتية خطوة بخطوة. حتى تلك النصوص التي تتعلق بشكل أساسى بالأدوات الصوتية تعطي معلومات محدودة عن كيفية توقّع أداء التجاويف، الفتحات، الأنابيب، الشاشات، الشقوق، والحواجز- والتى هى عبارة عن مكونات الدوائر الصوتية. لا يزعم هذا النص بأن تقدم علم نظرية الدائرة – الصوتية قد اقترب من حالة الكمال. ما يزال الكثير من نقط البحث الأساسية يجب دراستها. إن هذا النص يحاول تفسير وشرح آخر النظريات في مثل هذا الطريق للقارئ الذي يستطيع بناء وفهم أداء الأنواع العادية للأجهزة الصوتية.

إن السماعات الصوتحثية، الميكروفونات، والمرشحات الصوتية هى أكثر الأجهزة الشائعة التى تتكون من عناصر صوتية وميكانيكية. إن أحد العناصر الواضحة هو الهواء الذي يبث فيه الصوت. العناصر الأخرى هى التجاويف الهوائية، الأنابيب، الفتحات، وكلا الحواجز المسامية خلف وأمام الأغشية المهتزة بشكل نشيط. هذه العناصر المتنوعة لها معاوقات مصاحبة لها، ويمكن تمثيلها، فى بعض مناطق التردد، بعناصر بسيطة مجتمعة. فى المناطق الأخرى للتردد، يجب استخدام عناصر مرتبة، مثل الخطوط الكهربية، فى شرح أداء الأجهزة.

أول العناصر الصوتية الذي سوف نهتم به هو معاوقة الإشعاع (البث) للهواء نفسه. إن معاوقة

الإشعاع هى تقييم كمى للسلوك الصوتى الذي يتفاعل به الوسط ضد حركة السطح المهتز. بالإضافة إلى الطاقة اللازمة لتحريك السطح المهتز نفسه، تشع الطاقة إلى الهواء بواسطة الغشاء. يكون جزء من الطاقة المشعة مفيدا ويمثل طاقة خرج السماعة الصوتية. الطاقة المتبقية يتم تخزينها (مفاعلتها)، بمعنى أنها تعود إلى المولد. بالتالى، فإن للمعاوقة الصوتية جزء حقيقى، ويكون على شكل قدرة مشعة، وجزء تخيلى، ويكون عبارة عن قدرة مفاعلة.

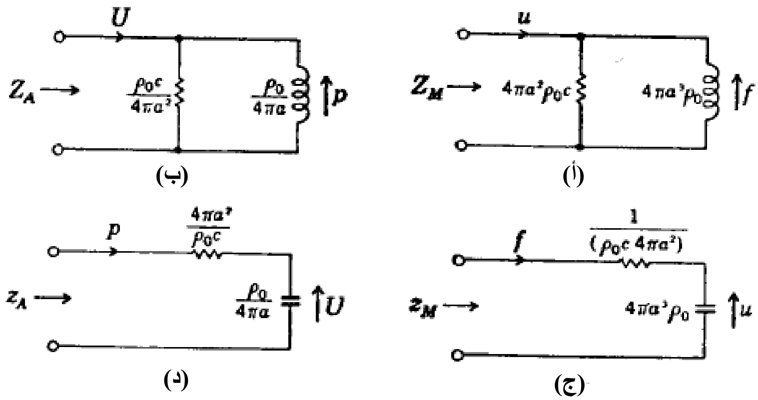
الأنواع الأربعة البسيطة من الأسطح المهتزة التى سوف تعالج هنا هى: 1- الكرة النابضة، 2- المكبس الدائرى المستوى المثبت فى سطح لانهائى (حاجز)، 3- المكبس الدائرى المستوى فى نهاية أنبوبة طويلة، و 4- المكبس الدائرى المستوى بدون حاجز. لقد قمنا بالفعل باشتقاق معاوقة الإشعاع للكرة النابضة. يظهر الحل الرياضى للإشعاع من المكبس الدائرى المثبت فى حاجز لانهائى فى الكثير من النصوص المتقدمة لذلك سوف نقدم هنا النتائج فقط [1]. كما سوف نحل بشكل تحليلى مسائل أكثر تعقيداً لمعاوقات الإشعاع ونماذج التوجيهية لمكبس الأنبوبة الطويلة والكبس المهتز بدون حاجز. إن هذه الحلول متاحة الأن، والنتائج موجودة فى هذا الجزء. تزداد صعوبة المعالجة الرياضية لمعظم الأنواع الأخرى من الأسطح المهتزة بشكل كبير، ولن تقدم نتائجها هنا.

1-5 كرة بسطح نابض منتظم

فى الجزء الرابع قمنا باشتقاق معاوقة الإشعاع لكرة لها سطح نابض منتظم. بالنسبة للنتائج، ارجع للمعادلة 2-64 والشكل 2-10.

من الشكل 2-10 نرى أنه فى حالة $ka < 0.3$، أى عندما يكون القطر أقل من $\frac{1}{10}$ الطول الموجى، فإن حمل المعاوقة على سطح الكرة يكون عبارة عن المفاعلة العامة (الشاملة) لأن مركبة المقاومة تكون صغيرة وتهمل مقارنة مع مركبة المفاعلة. هذا يعنى أن التحميل العام يمكن اعتباره طبقة الهواء الموجودة خارج الكرة، والتى يساوى سمكها 0.587 من نصف قطر الكرة.

عند كل الترددات، يمكن تمثيل التحميل المبين فى الشكل 2-10 بالدوائر المكافئة المبينة فى الشكل 5-1. فى هذا الشكل، تم بيان أحجام العنصر للحركيات والمعاوقات الميكانيكية والصوتية مع الدوائر.



الشكل 5-1 معاوقات وحركيات الإشعاع المضبوط لكل قيم ka لكرة لها سطح يشع قطرياً. (أ) تناظر ميكانيكى-معاوقة، (ب) تناظر صوتى-معاوقة، (ج) تناظر ميكانيكى-حركى، (د) تناظر صوتى-حركى. الكمية a نصف قطر الكرة.

5-2 مكبس دائرى مستوى فى حاجز لانهائى

تعطى المعاوقة الميكانيكية بوحدات الأوم الميكانيكى فى نظام م كجم ث (نيوتن-ثانية لكل متر) لحمل الهواء على أحد جوانب مكبس مستوى مثبت فى حاجز لانهائى (ارجع الى الشكل 5-2) ويهتز بشكل جيبى بالعلاقة [1,2] ،

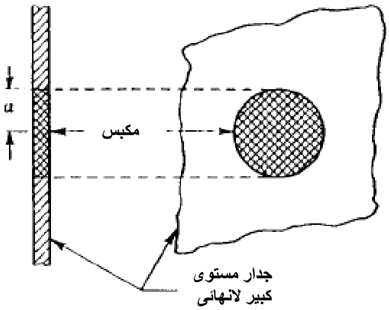
$$Z_M = \Re_M + jX_M = \pi a^2 \rho_o c\left[1 - \frac{J_1(2ka)}{ka}\right] + j\frac{\pi\rho_o c}{2k^2}K_1(2ka) \qquad 5\text{-}1$$

حيث Z_M المعاوقة الميكانيكية بالنيوتن - ثانية لكل متر، بمعنى بوحدات الأوم الميكانيكى فى نظام م كجم ث، a نصف قطر المكبس بالمتر، ρ_o كثافة الغاز بالكيلوجرام لكل متر مكعب، c سرعة الصوت بالمتر لكل ثانية، $\Re_M$ المقاومة الميكانيكية بالنيوتن - ثانية لكل متر. يدل الحرف الألمانى $\Re$ إلى أن المركبة المقاومية تكون دالة فى التردد، X_M المفاعلة الميكانيكية بالنيوتن - ثانية لكل متر، $k=\omega/c=2\pi/\lambda$ العدد الموجى، J_1 و K_1 نوعين من دالة بيسيل لهما المتسلسلات التالية[3,4]،

$$J_1(W) = \frac{W}{2} - \frac{W^3}{2^2\cdot 4} + \frac{W^5}{2^2\cdot 4^2\cdot 6} - \frac{W^7}{2^2\cdot 4^2\cdot 6^2\cdot 8}\cdots \qquad 5\text{-}2$$

$$K_1(W) = \frac{2}{\pi}\left(\frac{W^3}{3} - \frac{W^5}{3^2 \cdot 5} + \frac{W^7}{3^2 \cdot 5^2 \cdot 7} \ldots\right) \qquad 5\text{-}3$$

حيث $W = 2ka$



الشكل 5-2 مكبس دائرى مستوى يهتز عمودى على جدار لانهائى مستوى.

يبين الشكل 5-3 الجزء الحقيقى والجزء التخيلى للمقدار

$$\frac{Z_M}{\pi a^2 \rho_0 c} = \frac{\Re_M + jX_M}{\pi a^2 \rho_0 c} \qquad 5\text{-}4$$

كدالة فى ka. يشير الحرف الألمانى $\Re$ إلى أن الكمية تتغير مع التردد.

بالمثل، يبين الشكل 5-4 الجزء الحقيقى والجزء التخيلى للحركية الميكانيكية

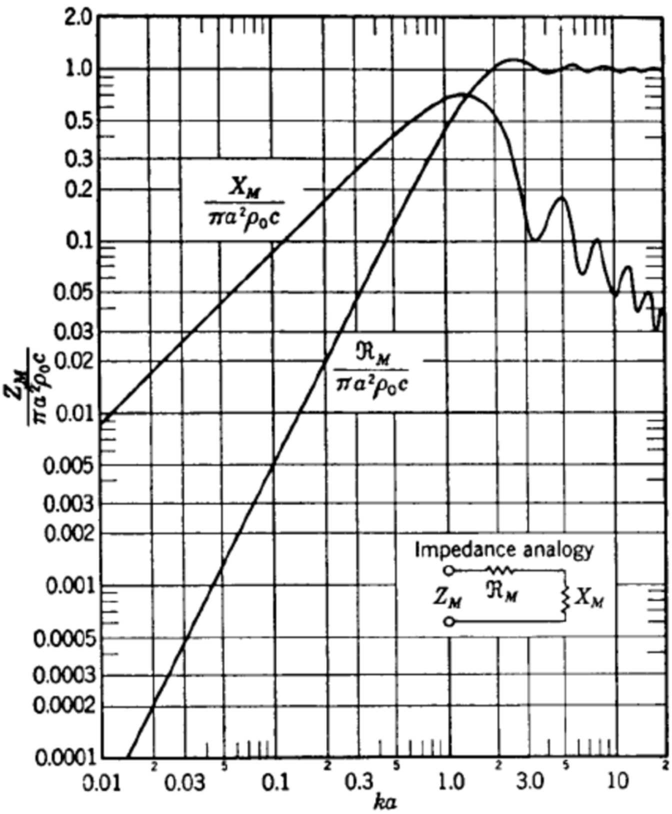
$$z_M \pi a^2 \rho_0 c = \pi a^2 \rho_0 c(r_M + jx_M) = \pi a^2 \rho_0 c\left(\frac{\Re_M}{\Re_{M^2} + X_{M^2}} - j\frac{X_M}{\Re_{M^2} + X_{M^2}}\right) \qquad 5\text{-}5$$

تكون الحركية الميكانيكية بالمتر لكل نيوتن – ثانية، أى بالأوم الميكانيكى فى م كجم ث.

تستخدم البيانات الموجودة فى الشكل 5-3 عند التعامل مع تناظر المعاوقة والبيانات فى الشكل 5-4 عند التعامل مع تناظر الحركية.

نرى من الشكل 5-3 أنه، فى حالة $ka < 0.5$، تتغير المفاعلة مع الرتبة الأولى للتردد بينما تتغير المقاومة مع الرتبة الثانية للتردد. عند الترددات العالية، فى حالة $ka > 5$، تصبح المفاعلة صغيرة مقارنة مع المقاومة، وتقترب المقاومة من قيمة ثابتة.

على الجانب الأخر، يكون سلوك الحركية أفضل. تكون المستجيبية ثابتة فى حالة $ka < 0.5$، وتكون ثابتة أيضاً فى حالة $ka > 5$ بالرغم من أن قيمتها تكون أكبر.



الشكل 5-3 الأجزاء الحقيقى والتخيلى للمعاوقة الميكانيكية المُطبعة ($Z_M / \pi a^2 \rho_o c$) لحمل الهواء على أحد جوانب مكبس مستوى ذو نصف قطر a ومثبت فى حاجز لانهائى. تم رسم التردد على تدريج مطبع، حيث $ka = 2\pi fa / c = 2\pi a / \lambda$. لاحظ أيضاً أن المحور الصادى يساوى $Z_A \pi a^2 / \rho_o c$ ، حيث Z_A المعاوقة الصوتية.

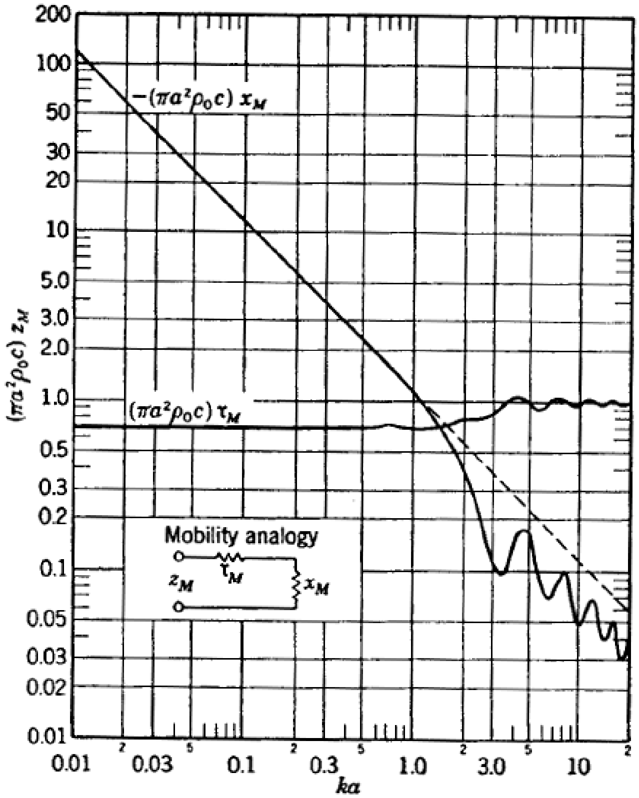
الدوائر التناظرية التقريبية.

يقترح السلوك الذي لاحظناه توا أنه، باستثناء التذبذبات فى المنحنيات عندما تكون ka بين 1 و 5، فإنه يمكن تقريب معاوقة وحركية المكبس ذات الحاجز اللانهائى على كامل مدى التردد بواسطة الدوائر المناظرة فى الشكل 5-5. تعطى تلك الدوائر المعاوقات والحركيات الميكانيكية والصوتية، حيث

$$R_{M2} = \pi a^2 \rho_0 c \text{ mks mechanical ohms (newton-sec/m)} \tag{5.6}$$

$$R_M = R_{M2} + R_{M1} = 128 a^2 \rho_0 c / 9\pi = 4.53 a^2 \rho_0 c \text{ mks mechanical ohms} \tag{5.7}$$

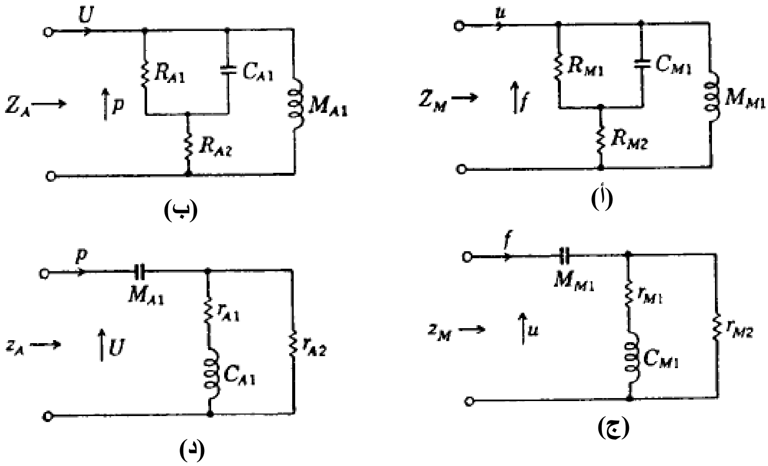
$$R_{M1} = 1.386a^2\rho_0 c \text{ mks mechanical ohms} \quad (5.8)$$
$$C_{M1} = 0.6/a\rho_0 c^2 \text{ m/newton} \quad (5.9)$$
$$M_{M1} = 8a^3\rho_0/3 = 2.67a^3\rho_0 \text{ kg} \quad (5.10)$$
$$r_{M2} = 1/\pi a^2\rho_0 c = 0.318/a^2\rho_0 c \text{ mks mechanical mohms} \quad (5.11)$$
$$r_{M1} = 0.721a^2\rho_0 c \text{ mks mechanical mohms} \quad (5.12)$$
$$R_{A2} = \rho_0 c/\pi a^2 = 0.318\rho_0 c/a^2 \text{ mks acoustic ohms} \quad (5.13)$$



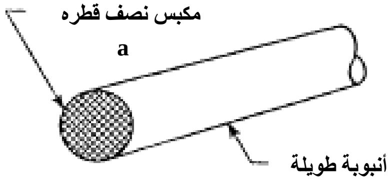
الشكل 5-4 الأجزاء الحقيقى والتخيلى للحركية الميكانيكية المُطبعة ($\pi a^2 \rho_o c z_M$) لحمل الهواء على أحد جوانب مكبس مستوى ذات نصف قطر a ومثبت فى حاجز لانهائى. تم رسم التردد على مقياس مطبع، حيث $ka = 2\pi f\, a/c = 2\pi\, a/\lambda$. لاحظ أيضاً أن المحور الصادى يساوى $z_A \rho_o c/\pi a^2$ ، حيث z_A الحركية الصوتية.

$$R_A = R_{A2} + R_{A1} = 128\rho_0 c/9\pi^3 a^2$$
$$= 0.459\rho_0 c/a^2 \text{ mks acoustic ohms} \quad (5.14)$$
$$R_{A1} = 0.1404\rho_0 c/a^2 \text{ mks acoustic ohms} \quad (5.15)$$
$$C_{A1} = 5.94a^3/\rho_0 c^2 \text{ m}^5\text{/newton} \quad (5.16)$$
$$M_{A1} = 8\rho_0/3\pi^2 a = 0.27\rho_0/a \text{ kg/m}^4 \quad (5.17)$$
$$r_{A2} = \pi a^2/\rho_0 c \text{ mks acoustic mohms} \quad (5.18)$$
$$r_{A1} = 7.12a^2/\rho_0 c \text{ mks acoustic mohms} \quad (5.19)$$

كل الثوابت بدون أبعاد وتم اختيارها لتعطى أفضل متوسط لتطابق الدوال مع الأشكال 5-3 و 5-4.



الشكل 5-5 المعاوقات والحركيات التقريبية لإشعاع مكبس بحاجز لانهائى أو لمكبس فى نهاية أنبوبة طويلة لكل قيم ka . (أ) تناظر المعاوقة – الميكانيكية، (ب) تناظر المعاوقة – الصوتية، (ج) تناظر الحركية – الميكانيكية، (د) تناظر الحركية – الصوتية.



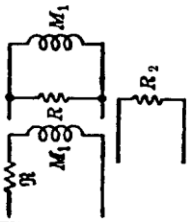
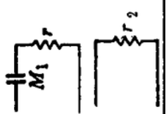
الشكل 5-6 مكبس يهتز فى نهاية أنبوبة طويلة.

<u>تقريبات التردد المنخفض والتردد العالى.</u>

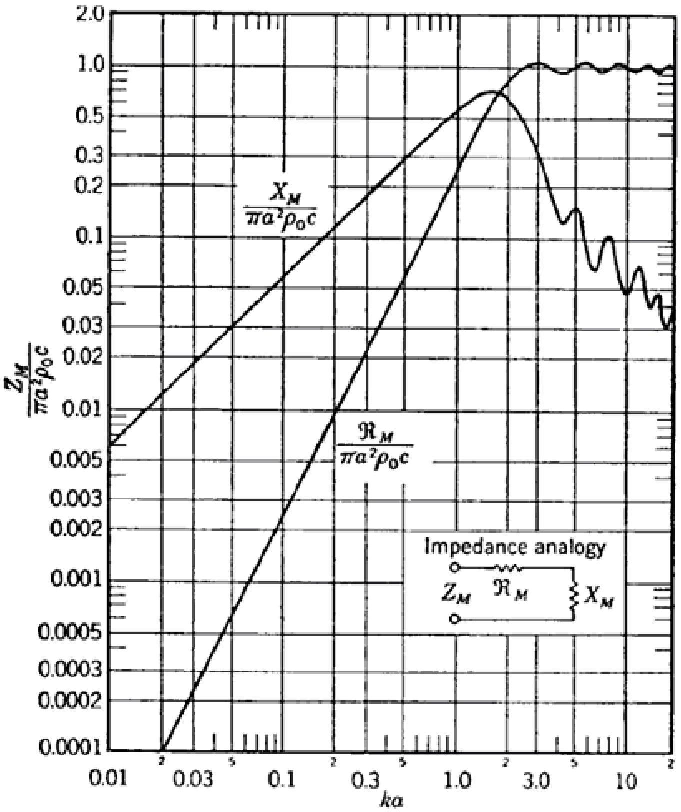
عند الترددات المنخفضة والعالية يمكن تقريب هذه الدوائر بالدائرة البسيطة المعطاه فى العمود الأخير من الجدول 5-1.

من الواضح أنه، عند $ka < 0.5$ (بمعنى يكون محيط المكبس $2\pi a$ أقل من نصف الطول الموجى $\lambda/2$)، فإن حمل المعاوقة الممثل بالهواء على المكبس المهتز هو تلك الكتلة المتصلة على التوازى بواسطة مقاومة كبيرة جداً. بمعنى أخر $R^2 = (R_1 + R_2)^2$ تكون كبيرة مقارنة مع $\omega^2 M_1{}^2$. فى الحقيقة، يمكن تخيل كتلة التحميل هذه بأنها طبقة من الهواء مساحتها تساوى مساحة المكبس وسمكها يساوى 0.85 مرة قدر نصف القطر، لأن $M_{M1} = 2.67 a^3 \rho_o \approx (\pi a^2)(0.85 a)\rho_o$.

الجدول 5-1 معاوقة وحركية الإشعاع لأحد جوانب مكبس بحاجز لا نهائى*.

Impedance	Mechanical f = drop u = flow	Specific acoustic p = drop u = flow	Acoustic p = drop U = flow	Analogous circuits
$ka < 0.5$: Series resistance, $\Re$ Shunt resistance, R Mass, M_1	$\Re_M = 1.57\omega^2 a^4\rho_0/c$ $R_M = 4.53a^2\rho_0 c$ $M_{M1} = 2.67a^3\rho_0$	$\Re_S = 0.5\omega^2 a^2\rho_0/c$ $R_S = 1.441\rho_0 c$ $M_{S1} = 0.849a\rho_0$	$\Re_A = 0.159\omega^2\rho_0/c$ $R_A = 0.459\rho_0 c/a^2$ $M_{A1} = 0.270\rho_0/a$	
$ka > 5$: Resistance, R_2	$R_{M2} = \pi a^2\rho_0 c$	$R_{S2} = \rho_0 c$	$R_{A2} = \rho_0 c/\pi a^2$	
Mobility	u = drop f = flow	u = drop p = flow	U = drop p = flow	
$ka < 0.5$: Series responsiveness, r Mass, M_1	$r_M = 0.221/a^2\rho_0 c$ $M_{M1} = 2.67a^3\rho_0$	$r_S = 0.694/\rho_0 c$ $M_{S1} = 0.849a\rho_0$	$r_A = 2.18a^2/\rho_0 c$ $M_{A1} = 0.270\rho_0/a$	
$ka > 5$: Responsiveness, r_2	$r_{M2} = 1/\pi a^2\rho_0 c$	$r_{S2} = 1/\rho_0 c$	$r_{A2} = \pi a^2/\rho_0 c$	

* يعطى هذا الجدول حجم عناصر الدوائر التناظرية فى المدى حيث $ka < 0.5$ و $ka > 5.0$. كل الثوابت بدون أبعاد. فى المدى بين $ka < 0.5$ و $ka > 5.0$ ، يجب استخدام الدوائر التقريبية للشكل 5-5 أو المخططات المضبوطة للأشكال 5-3 و 5-4.

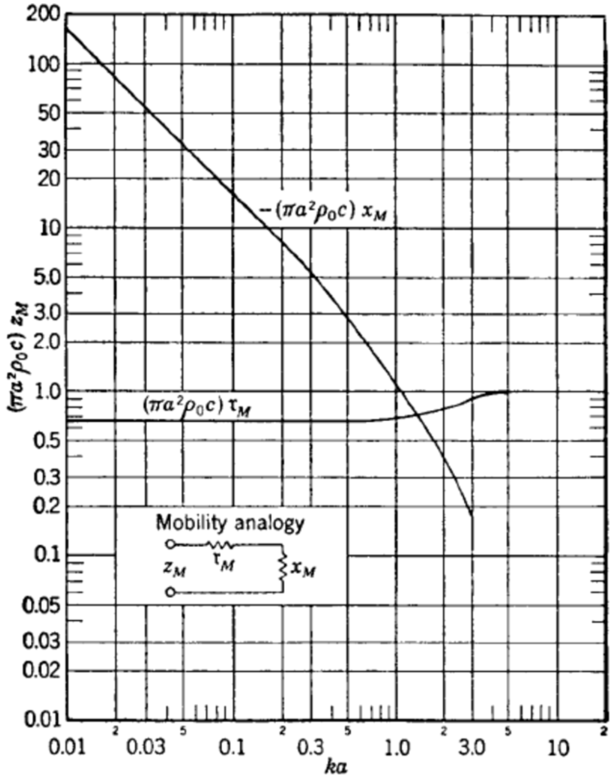


الشكل 5-7 الأجزاء الحقيقى والتخيلى للمعاوقة الميكانيكية المُطبعة ($Z_M / \pi a^2 \rho_o c$) لحمل الهواء على أحد جوانب مكبس مستوى ذات نصف قطر a فى نهاية أنبوبة طويلة. تم رسم التردد على مقياس مطبع، حيث $ka = 2\pi f\ a / c = 2\pi\, a / \lambda$. لاحظ أيضاً أن المحور الصادى يساوى $Z_A \pi\, a^2 / \rho_o c$ ، حيث Z_A المعاوقة الصوتية.

عند الترددات العالية، $ka > 5$ ، يسلك حمل الهواء بالضبط كما لو أنه متصل بإحدى نهايات أنبوبة لها نفس القطر مثل المكبس ونهايتها الأخرى تكون ممتصة بشكل تام. كما نرى من المعادلة 2-60، فإن مقاومة الدخل الميكانيكية لمثل تلك الأنبوبة تكون $\pi a^2 \rho_o\, c$. بالتالى، يمكن توقع بشكل حدسي أنه عند الترددات العالية يقوم المكبس الصلب المهتز بشع الصوت للخارج على هيئة خطوط عمودية على وجه المكبس. إن هذا فى الواقع هو حالة المجال-القريب. لكن، على مسافة بعيدة ينتشر الإشعاع، كما تعلمنا من الباب السابق.

3-5 مكبس دائرى فى نهاية أنبوبة طويلة. [5]

تعطى المعاوقة الميكانيكية (بالنيوتن-ثانية/المتر) لحمل الهواء على أحد جوانب المكبس المستوى فى نهاية الأنبوبة الطويلة (الشكل 5-6) والذي يهتز بشكل جيبى بتعبير رياضى معقد سوف لن يقدم هنا.



الشكل 5-8 الأجزاء الحقيقى والتخيلى للحركية الميكانيكية المُطبعة ($\pi a^2 \rho_o c\, z_M$) لحمل الهواء على أحد جوانب مكبس مستوى ذات نصف قطر a فى نهاية أنبوبة طويلة. تم رسم التردد على مقياس مطبع، حيث $ka = 2\pi f\, a/c = 2\pi\, a/\lambda$. لاحظ أيضاً أن المحور الصادى يساوى $z_A \rho_o c/\pi\, a^2$ ، حيث z_A الحركية الصوتية.

يبين الشكل 5-7 منحنيات الأجزاء الحقيقية والتخيلية للمعاوقة الميكانيكية المُطبعة ($Z_M / \pi a^2 \rho_o c$) كدالة فى ka للمكبس المركب. بالمثل، يبين الشكل 5-8 منحنيات الأجزاء الحقيقية والتخيلية للحركية الميكانيكية المطبعة. تستعمل بيانات الشكل 5-7 مع تناظرات المعاوقة وبيانات الشكل 5-8 مع تناظرات الحركية.

لعمل التقريب المناسب يمكن تمثيل معاوقة الإشعاع للمكبس عند نهاية الأنبوبة الطويلة على كامل

مدى التردد بواسطة نفس دوائر التناظر للمكبس ذو الحاجز اللا نهائى والمبينة فى الشكل 5-5، أن تكون العناصر فى هذه الحالة هى:

$$R_{M2} = \pi a^2 \rho_0 c \text{ mks mechanical ohms} \tag{5.20}$$

$$R_M = R_{M2} + R_{M1} = 4\pi(0.6133)^2 a^2 \rho_0 c = 4.73 a^2 \rho_0 c \text{ mks mechanical ohms} \tag{5.21}$$

$$R_{M1} = 0.504\pi a^2 \rho_0 c = 1.58 a^2 \rho_0 c \text{ mks mechanical ohms} \tag{5.22}$$

$$C_{M1} = 0.55/a\rho_0 c^2 \text{ m/newton} \tag{5.23}$$

$$M_{M1} = 0.6133\pi a^3 \rho_0 = 1.927 a^3 \rho_0 \text{ kg} \tag{5.24}$$

$$r_{M2} = 1/\pi a^2 \rho_0 c = 0.318/a^2 \rho_0 c \text{ mks mechanical mohms} \tag{5.25}$$

$$r_{M1} = 0.633/a^2 \rho_0 c \text{ mks mechanical mohms} \tag{5.26}$$

$$R_{A2} = \rho_0 c/\pi a^2 = 0.318 \rho_0 c/a^2 \text{ mks acoustic ohms} \tag{5.27}$$

$$R_A = R_{A2} + R_{A1} = (4)(0.6133)^2 \rho_0 c/\pi a^2 = 0.479 \rho_0 c/a^2 \text{ mks acoustic ohms} \tag{5.28}$$

$$R_{A1} = 0.504 \rho_0 c/\pi a^2 = 0.1604 \rho_0 c/a^2 \text{ mks acoustic ohms} \tag{5.29}$$

$$C_{A1} = 5.44 a^3/\rho_0 c^2 \text{ m}^5\text{/newton} \tag{5.30}$$

$$M_{A1} = 0.1952 \rho_0/a \text{ kg/m}^4 \tag{5.31}$$

$$r_{A2} = \pi a^2/\rho_0 c \text{ mks acoustic mohms} \tag{5.32}$$

$$r_{A1} = 6.23 a^2/\rho_0 c \text{ mks acoustic mohms} \tag{5.33}$$

فى مناطق التردد حيث $ka < 0.5$ و $ka > 5$ ، يمكن استخدام دوائر تناظرية من النوع المبين فى الجدول 5-2.

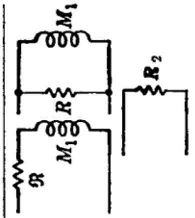
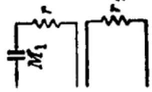
5-4 قرص حر دائرى مستوى[6] .

القرص فى الفضاء الحر بدون تركيب يحيطه هو النموذج المناسب، عند الترددات المنخفضة، للسماعة الصوتية ذات البث المباشر بدون حاجز ومن أى نوع. لا يمكن رسم دائرة بسيطة مكافئة لهذه الحالة، تصلح بالتقريب لكل الترددات، مثل تلك المبينة فى الشكل 5-5. لكن، عند الترددات المنخفضة جداً، يمكن تمثيل المعاوقة بمجموعة من الكتل المتوالية ومقاومة تعتمد على التردد تماما كما فعلنا للمكابس ذات الحواجز.

يبين الشكل 5-9 رسومات الأجزاء الحقيقية والتخيلي للمعاوقة الميكانيكية المُطبعة $Z_M/\pi a^2 \rho_o c$ كدالة فى ka للقرص الحر. مستوى دائرى ذات نصف قطر a فى الفضاء الحر. تم استخدام بيانات الشكل 5-9 فيما يتعلق بتناظرات المعاوقة. يمكن الحصول على الحركية المركبة من مقلوب المعاوقة

المركبة.

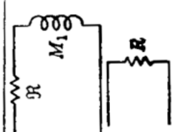
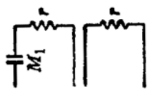
الجدول 5-2 معاوقة وحركية الإشعاع للجانب الخارجى لمكبس مستوى فى نهاية أنبوبة طويلة*.

Impedance	Mechanical	Specific acoustic	Acoustic	Analogous circuits
	f = drop u = flow	p = drop u = flow	p = drop U = flow	
$ka < 0.5$: Series resistance, $\Re$ Shunt resistance, R Mass, M_1	$\Re_M = 0.7854\omega^2 a^4 \rho_0/c$ $R_M = 4.73a^2\rho_0 c$ $M_{M1} = 1.927a^3\rho_0$	$\Re_S = 0.247\omega^2 a^2 \rho_0/c$ $R_S = 1.505\rho_0 c$ $M_{S1} = 0.6133a\rho_0$	$\Re_A = 0.0796\omega^2\rho_0/c$ $R_A = 0.479\rho_0 c/a^2$ $M_{A1} = 0.1952\rho_0/a$	
$ka > 5$: Resistance, R_2	$R_{M2} = \pi a^2 \rho_0 c$	$R_{S2} = \rho_0 c$	$R_{A2} = \rho_0 c/\pi a^2$	
Mobility	u = drop f = flow	u = drop p = flow	U = drop p = flow	
$ka < 0.5$: Series responsiveness, r Mass, M_1	$r_M = 0.2116/a^2\rho_0 c$ $M_{M1} = 1.927a^3\rho_0$	$r_S = 0.665/\rho_0 c$ $M_{S1} = 0.6133a\rho_0$	$r_A = 2.09a^2/\rho_0 c$ $M_{A1} = 0.1952\rho_0/a$	
$ka > 5$: Responsiveness, r_2	$r_{M2} = 1/\pi a^2 \rho_0 c$	$r_{S2} = 1/\rho_0 c$	$r_{A2} = \pi a^2/\rho_0 c$	

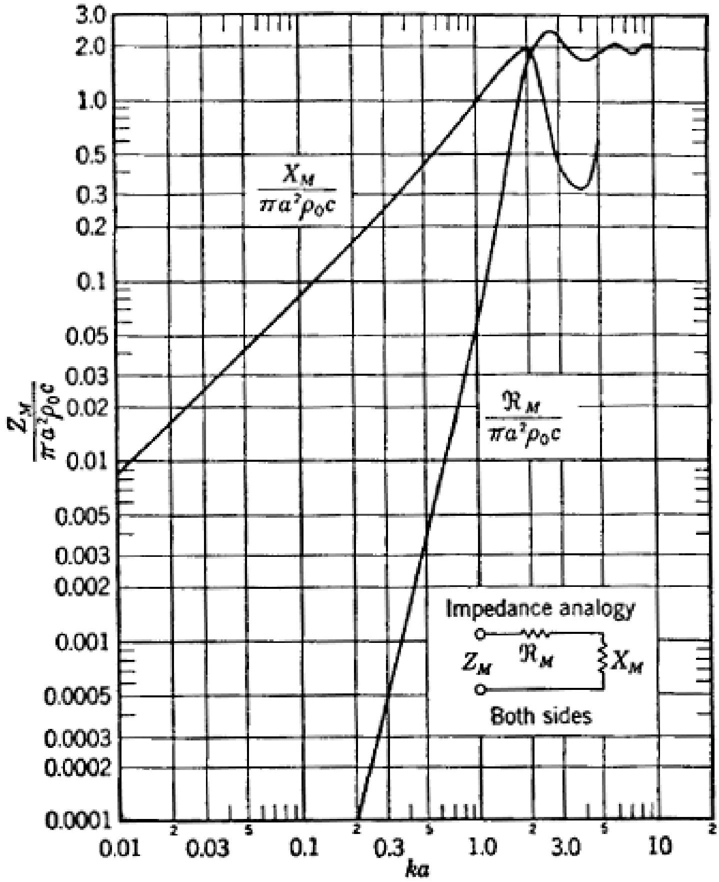
يعطى هذا الجدول حجم عناصر الدوائر التناظرية فى المدى حيث $ka < 0.5$ و $ka > 5.0$. كل الثوابت

بدون أبعاد. فى المدى بين $ka < 0.5$ و $ka > 5.0$ ، يجب استخدام الدوائر التقريبية للشكل 5-5 أو المخططات المضبوطة للأشكال 5-7 و 5-8.

الجدول 5-3 معاوقة وحركية الإشعاع للجانب الخارجى لكلا جانبى مستوى دائرى فى فضاء حر*.

Impedance	Mechanical	Specific acoustic	Acoustic	Analogous circuits
	f = drop u = flow	p = drop u = flow	p = drop U = flow	
$ka < 0.5$: Series resistance, $\Re$ Mass (both sides of piston), M_1	$\Re_M = 0.1886a^6\rho_0\omega^4/c^3$ $M_{M1} = 2.67a^3\rho_0$	$\Re_S = 0.0600a^4\rho_0\omega^4/c^3$ $M_{S1} = 0.850a\rho_0$	$\Re_A = 0.01901a^2\rho_0\omega^4/c^3$ $M_{A1} = 0.2705\rho_0/a$	
$ka > 5$: Resistance (both sides of piston), R	$R_M = 2\pi a^2\rho_0 c$	$R_S = 2\rho_0 c$	$R_A = 2\rho_0 c/\pi a^2$	
Mobility	u = drop f = flow	u = drop p = flow	U = drop p = flow	
$ka < 0.5$: Series responsiveness, r Mass (both sides of piston), M_1	$r_M = 0.0265\omega^2/\rho_0 c^3$ $M_{M1} = 2.67a^3\rho_0$	$r_S = 0.0832\omega^2 a^2/\rho_0 c^3$ $M_{S1} = 0.850a\rho_0$	$r_A = 0.261\omega^2 a^4/\rho_0 c^3$ $M_{A1} = 0.2705\rho_0/a$	
$ka > 5$: Responsiveness (both sides of piston), r	$r_M = 1/2\pi a^2\rho_0 c$	$r_S = 1/2\rho_0 c$	$r_A = \pi a^2/2\rho_0 c$	

* يعطى هذا الجدول حجم عناصر الدوائر التناظرية فى المدى حيث $ka < 0.5$ و $ka > 5.0$. كل الثوابت بدون أبعاد. فى المدى بين $ka < 0.5$ و $ka > 5.0$ ، يجب استخدام الدوائر التقريبية للشكل 5-9.



الشكل 5-9 الأجزاء الحقيقى والتخيلى للمعاوقة الميكانيكية المُطبعة ($Z_M / \pi a^2 \rho_o c$) لحمل الهواء على كلا جانبى قرص مستوى دائرى ذو نصف قطر a فى الفضاء الحر. تم رسم التردد على مقياس مطبع، حيث $ka = 2\pi f\ a / c = 2\pi\, a / \lambda$. لاحظ أيضاً أن المحور الصادى يساوى $Z_A \pi\, a^2 / \rho_o c$ ، حيث z_A المعاوقة الصوتية المطبعة.

فى مناطق التردد حيث $ka < 0.5$ و $ka > 5$ ، فإنه يمكن استخدام الدوائر المناظرة من النوع المبين فى الجدول 5-3.

الجزء الثالث عشر – العناصر الصوتية

5-5 المطاوعة الصوتية

الأنبوبة المغلقة

فى المعادلة 2-50 رأينا أن طول الأنبوبة (الصلبة المغلقة من احد الجوانب) التى لها نصف قطر (بالمتر) أكبر من $\frac{0.05}{\sqrt{f}}$ والأقل من $\frac{10}{f}$ لها معاوقة دخل صوتية عند النهاية المفتوحة تعطى بالعلاقة،

$$Z_A = \frac{Z_s}{\pi a^2} = \frac{-\rho_o c}{\pi a^2} \cot kl' \qquad 5\text{-}34$$

حيث Z_A المعاوقة الصوتية بالأوم الميكانيكى ف م كجم ث، و Z_s المعاوقة الصوتية النوعية بوحدات الرايليى فى م كجم ث، a نصف قطر الأنبوبة بالمتر، l' طول الأنبوبة بالمتر.

بالنسبة لقيم k غير الكبيرة جداً، فإن ظل التمام يمكن أن يستبدل بالحدين الأولين من شكل المتسلسلة المكافئة لهما،

$$\cot kl' = \frac{1}{kl'} - \frac{kl'}{3} - \frac{(kl')^3}{45} .... \qquad 5\text{-}35$$

المعادلة 5-34 تصبح

$$Z_A \approx -j\frac{1}{\omega(V/\rho_o c^2)} + j\omega\frac{l'\rho_o}{3\pi a^2} \qquad 5\text{-}36$$

حيث $V = l'\pi a^2$ هو حجم الهواء فى الأنبوبة. المعاوقة الصوتية Z_A تكون مجموعة من كتلة صوتية $(l'\rho_o / 3\pi a^2)$ ومطاوعة صوتية $(V/\rho_o c^2)$ على التوالى. تصلح المعادلة 5-36 خلال 5% من الأطوال حتى $\frac{\lambda}{7}$ تقريباً. (فى المعادلة 5-42 تم تعريف أن الكتلة الصوتية للأنبوبة القصيرة المفتوحة النهايات تساوى $M_A = \rho_o l' / \pi a^2$. بالتالى، إلى هذا الحد من التقريب، فإن كتلة الأنبوبة المغلقة يكون ثلث كتلة الأنبوبة المفتوحة)

إذا تم تمثيل معاوقة التجويف بالمجموعة المتوالية من كتلة صوتية و مطاوعة صوتية المبينة بالمعادلة 5-36،إن أبعاد تمثيل الدائرة - المجمعة من الجائز أن يتجاوز $l = \lambda / 8$. فى هذه الحالة يكون شكل التجويف مهم لأن مقدار الحث يتضمن النسبة $l / \pi a^2$، أى الطول مقسوم على مساحة المقطع. يبين الشكل 5-11أ مجموعة التوالى هذه التى تتكون من كتلة ومطاوعة.

الحجم المغلق.

إذا كان للحد الثانى من المعادلة 5-36 مقدار صغير مقارنة مع مقدار الحد الأول، ربما يكون 5% من قيمة الحد الأول، فإنه يمكننا إهماله وكتابة،

$$Z_A = -j \frac{1}{\omega(V / \rho_o c^2)} = -j \frac{1}{\omega C_A} \qquad \text{5-37أ}$$

حيث

$$C_A = \frac{V}{\rho_o c^2} = \frac{V}{\gamma P_o} \qquad \text{5-38}$$

هى المطاوعة الصوتية بوحدات م^5/نيوتن. أن تحديد 5% المذكور من قبل يعنى أن l' يجب أن تكون أقل من $\frac{\lambda}{16}$، حيث λ الطول الموجى بالمتر. يبين الشكل 5-11ب تلك المطاوعة. بالنسبة للمكابس الصغيرة نسبياً، بشرط أن الأبعاد القصوى للتجويف لا تزيد عن $\frac{\lambda}{8}$، فإن المعاوقة الصوتية التى تمثل المكبس تكون على الصورة،

$$Z_A = -j \frac{1}{\omega(V / \gamma P_o)} + j\omega \frac{0.85 \rho_o}{\pi a} \qquad \text{5-37ب}$$

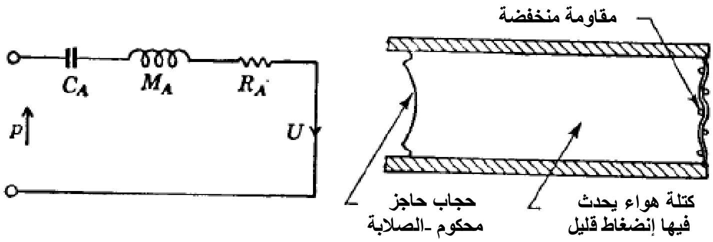
بالنسبة للحد الثانى الذي يهمل خلال الـ 5% فإن $(a\lambda^2 / V)$ يجب أن تكون أكبر من 200. بالنسبة لحجم المكابس المتوسطة، سوف نقدم المناقشة لاحقاً.

تكون المطاوعة الصوتية التى يتم الحصول عليها بضغط الهواء فى حجم مغلق عبارة عن جهاز ثنائى الطرف مثل المبين فى الشكل 5-11ب، لكن يجب أن يكون أحد الأطراف موضوع عند "الجهد الأرضى". بمعنى أن، أحد الأطراف يكون خارج الوعاء الذي يحتوي التجويف، ويكون دائماً عند الضغط الجوى. مع هذا الترتيب للمطاوعة الصوتية (ارجع الى الأشكال 3-25 و 3-31 على سبيل

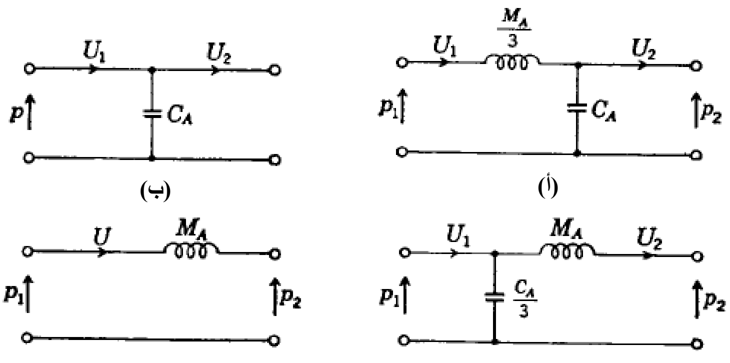
المثال) لا يمكن أبداً زرع (إدخال) مطاوعة بين المقاومات الصوتية والكتل الصوتية مثل، على سبيل المثال، فى الأفرع العلوية من الشكل 3-32.

الغشاء المحكوم – بالصلابة

للحصول على نوع "توالي" من المطاوعة الصوتية يجب استخدام غشاء أو حجاب حاجز مشدود. ترن الأغشية والأحجبة الحاجزة عند ترددات مختلفة بحيث يكون مدى التردد التى تؤثر عنده محدد بمنطقة أسفل بكثير من أقل تردد للرنين. يبين الشكل 5-10 مجموعة توالى تتكون من مطاوعة، مقاومة، وكتلة صوتية.



الشكل 5-10 مثال لمجموعة مطاوعة صوتية توالى تم الحصول عليها من حجاب حاجز محكوم بالصلابة.



الشكل 5-11 دوائر تناظرية تقريبية لأنبوبة قصيرة متوسطة القطر. (أ) و (ب) دوائر تستخدم عندما تكون p_2/U_2 كبيرة جداً (مغلقة النهاية). (ج) و (د)) دوائر تستخدم عندما تكون p_2/U_2 صغيرة جداً (مفتوحة النهاية). تعطى الدوائر (أ) و (ج) المعاوقة خلال 5% فى حالة طول الأنبوبة l' الأقل من $\lambda/8$. تعطى الدوائر (ب) و (د) المعاوقة خلال 5% فى حالة طول الأنبوبة l' الأقل من $\lambda/16$.

المثال 5-1

تم استخدام دورق من الطراز القديم كالمبين فى الشكل 5-12 فى فرقة رقص ريفية كآلة موسيقية. طلب منك تحليل الأداء الصوتى لهذا الدورق. بفرض أن الأبعاد الداخلية للدورق هى القطر يساوى

8 بوصة، وارتفاع التجويف الهوائى يساوى 10 بوصة، أرسم الدائرة المناظرة، وعين أحجام العنصر والمعاوقة الصوتية لجزء تجويف الهواء للدورق عند 50، 100، و 300 هيرتز. افترض أن $T = 23^o\text{C}$ و $P_o = 10^5 \text{ newton/m}^2$. (ملاحظة: سوف يتم مناقشة جزء الرقبة لاحقاً فى هذا الجزء.)

الحل

تكون سرعة الصوت عند $T = 23^o\text{C}$ حوالى 1133 ft/sec. بالتالى، فإن $\lambda_{50} = 22.66 \text{ ft}$، $\lambda_{100} = 11.33 \text{ ft}$، و $\lambda_{300} = 3.78 \text{ ft}$.

يكون الطول l للدورق هو 0.833 ft. بالتالى فإن،

$$l = \frac{\lambda_{50}}{27} = \frac{\lambda_{100}}{13.6} = \frac{\lambda_{300}}{4.5} = 0.833 \text{ ft}$$

عند 50 هيرتز، حيث $l/\lambda = 1/27$، فإن جزء تجويف الدورق يمكن تمثيلها بواسطة مطاوعة صوتية كالاتي،

$$C_A = \frac{V}{\gamma P_o} = \frac{8.24\times10^{-3}}{1.4\times10^5} = 5.89\times10^{-8} \text{ m}^5\text{/newton}$$

$$Z_A = -j\frac{10^8}{314\times5.89} = -j5.4\times10^4 \text{ mks acoustic ohms}$$

عند 100 هيرتز، حيث $l/\lambda = 1/14$، يمكن تمثيل جزء تجويف الدورق بواسطة كتلة صوتية على التوالى مع مطاوعة صوتية.

$$M_A = \frac{l\rho_o}{3\pi a^2} = \frac{0.254\times1.19}{3(0.1016)^2} = 3 \text{ kg/m}^4$$

$$C_A = 5.89\times10^{-5} \text{ m}^5\text{/newton}$$

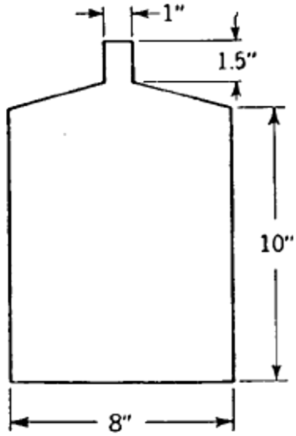
$$Z_A = -j\left(628\times3 - \frac{10^8}{628\times5.89}\right) = -j2.51\times10^4 \text{ mks acoustic ohms}$$

عند 300 هيرتز، حيث $l/\lambda = 1/4.5$، فإن المعاوقة الصوتية لجزء تجويف الدورق يجب أن تحل

مباشرة من المعادلة 5-34.

$$Z_A = \frac{-j\rho_o c}{\pi a^2}\cot kl = \frac{-j(1.19\times 345.4)}{\pi (0.1016)^2}\cot\frac{2\pi\times 300\times 0.254}{345.4}$$

$$Z_A = -j4.5\times 10^3 \quad \text{mks acoustic ohms}$$



الشكل 5-12 مخطط للدورق الموسيقى.

6-5 الكتلة الصوتية

الأنبوبة المفتوحة النهايتين ولها جدران صلبة تسلك ككتلة صوتية إذا كانت الأنبوبة قصيرة بدرجة كافية بحيث يتحرك الهواء فيها ككل بدون انضغاط ملحوظ. عند وضع الشروط الحدية، يتم افتراض أن ضغط الصوت عند الطرف المفتوح المقابل للمصدر يكون صفر تقريباً. هذه الفرضية ستكون حقيقية إذا ما كانت لمعاوقة إشعاع النهاية المفتوحة، التي تتصرف بشكل كبير مثل إشعاع مكبس إلى الهواء المفتوح. لكن، تكون معاوقة الإشعاع هذه صغيرة للأنبوبة الصغيرة القطر والتى تعمل فقط على زيادة الطول الظاهرى للأنبوبة قليلاً. لهذا، سوف تضاف معاوقة الإشعاع كعامل تصحيح فيما بعد.

<u>الأنبوبة المتوسطة القطر</u>

لكى يمكن إهمال الفقد اللزج داخل الأنبوبة، يجب ألا يكون نصف قطر الأنبوبة a (بالمتر) صغيراً جداً. أيضاً، لكي يمكن إهمال الرنين المستعرض فى الأنبوبة، يجب ألا يكون القطر كبيراً جداً. تكون المعادلات التالية صحيحة عندما يكون نصف القطر (بالمتر) أكبر من $\frac{0.05}{\sqrt{f}}$ وأقل من $\frac{10}{f}$ تقريباً.

حل معادلة الموجة فى بعد – واحد فى الجزء الثالث، مع الشرط الابتدائي $p=0$ عند $x=l$ ، عند الطرف المفتوح يثمر عن،

$$Z_A = j\frac{\rho_o c}{\pi a^2}\tan k\,l' \qquad 5\text{-}39$$

حيث Z_A المعاوقة الصوتية بالأوم الصوتى فى م كجم ث للأنبوبة المفتوحة ذات الطول l'. ρ_o كثافة الغاز بالكيلوجرام لكل متر مكعب، c سرعة الصوت بالمتر لكل ثانية، a نصف قطر الأنبوبة بالمتر، k العدد الموجى ويساوى $\frac{\omega}{c}$ بمقلوب المتر، و l' طول الأنبوبة بالمتر مقاس من النهاية المفتوحة حتى المستوى حيث يتم تعيين Z_A .

فى حالة قيم kl' الصغيرة، يمكن استبدال الظل بالحدود الأولى من المتسلسلة المكافئة لها،

$$\tan kl' = kl' + \frac{(kl')^2}{3} + \frac{2(kl')^5}{15} + ... \qquad 5\text{-}40$$

تصبح المعادلة 5-39 على النحو،

$$Z_A(l') \approx j\omega\frac{\rho_o c}{\pi a^2} + j\frac{\omega^2\rho_o l'^2}{3\pi a^2 c^2} + ... \qquad 5\text{-}41$$

الدائرة المكافئة للمعادلة 5-41 التى تصلح خلال 5% تقريباً لمدى التردد حيث $l' < \lambda/8$ تعطى فى الشكل 5-11ج. فى الدائرة المتناظرة،

$$M_A = \frac{\rho_o l'}{\pi a^2} \qquad 5\text{-}42$$

و تعطى C_A بالمعادلة 5-38. الكمية M_A هى الكتلة الصوتية بوحدات كجم/م^4.

فى حالة قيم $l' < \lambda/16$ ، فإن الحد الثانى من المعادلة 5-41 سوف يكون أقل من 5% الصغيرة كبير كالأول، لذلك

$$Z_A = j\omega\frac{\rho_o l'}{\pi a^2} = j\omega M_A \qquad 5\text{-}43$$

الدائرة المكافئة لهذه المعاوقة تكون كما هو مبين فى الشكل 5-11د.

تصحيحات النهاية. تصحيحات النهاية إذا كانت نهاية الأنبوبة تنتهى فى حاجز لانهائى – أنبوبة مشفهه (لها شفة).

تنتهي معظم الكتل الصوتية إما بنهاية واحدة أو تكون النهاية الأخرى مفتوحة على الهواء أو فى تجويف أكبر. هذا يعنى أنه يجب إضافة تصحيحات للطول l' فوق إذا قيمة M_A ستصبح صحيحة عندما لا تكون l' كبيرة. يكون التصحيح هو المعاوقة المعطاة فى الجدول 5-1 بواسطة الدوائر عند $ka < 0.5$. فى حالة أن a أقل من $\lambda / 25$، فإن الدوائر فى الجدول 5-1 تختزل ببساطة إلى عنصر واحد له القيمة M_{A1} (أنظر المعادلة 5-17). لذلك تصحيح النهاية l' الضرورى لكل نهاية بحاجز بسدادة مهتزة للهواء فى أنبوبة يكون،

$$l'' = \frac{M_{A2}\,\pi a^2}{\rho_o} = \frac{0.27\,\rho_o}{a}\frac{\pi a^2}{\rho_o} \approx 0.85a \;\text{ meters} \qquad 5\text{-}44$$

بالتالى، تصبح المعادلة 5-42 عسلى الصورة،

$$M_A = \frac{\rho_o\left[l' + (2)l''\right]}{\pi a^2} = \frac{\rho_o\, l}{\pi a^2} \;\; \text{kg/m}^4 \qquad 5\text{-}45$$

حيث الكمية l من التعريف تساوى الطول الفعال للأنبوبة بالمتر وتكون مجموع الطول الفعلى l' زائد تصحيح (ات) النهاية l'' (أو $2l''$). الرقم 2 بين الأقوس سوف يستخدم فقط إذا وجد نهايتين حرتين مع سدادة هواء مهتزة. إذا كانت الأنبوبة غير مستدير، يمكننا استبدال a بـ $\sqrt{S/\pi}$، حيث S مساحة المقطع العرضى للأنبوبة.

تصحيحات النهاية إذا كانت نهاية الأنبوبة حرية (أنبوبة بدون شفة)[5] (أنظر الشكل 5-6).

فى هذه الحالة، التصحيح لكل نهاية حرة من نهايات الأنبوبة يكون المعاوقة المعطاة بالجدول 5-2 بواسطة الدوائر فى حالة $ka < 0.5$. إذا كانت a أقل من $\lambda / 25$، فإن الدائرة فى الجدول 5-2 تختزل ببساطة إلى عنصر واحد له المقدار M_{A1} كما هو معطى بالمعادلة 5-31. بالتالى، تصحيح النهاية l'' الضرورى لكل نهاية حرة من سدادة الهواء المهتزة فى الأنبوبة يكون على الصورة

$$l'' = \frac{M_{A1}\,\pi a^2}{\rho_o} = \frac{0.1952\,\rho_o}{a}\frac{\pi a^2}{\rho_o} = 0.613a \quad \text{m} \qquad 5\text{-}46$$

وتصبح المعادلة 5-42 على الصورة،

$$M_A = \frac{\rho_o[l'+(2)l'']}{\pi a^2} = \frac{\rho_o l}{\pi a^2} \quad \text{kg/m}^4 \qquad 5\text{-}47$$

إذا لم تكون الأنبوبة مستديرة يمكننا استبدال a بـ $\sqrt{S/\pi}$ حيث S مساحة مقطع الأنبوبة. حالات العناصر التى تجمع كل من الكتلة الصوتية والمقاومة الصوتية سوف تناقش لاحقاً فى هذا الجزء.

المثال 5-2

للدورق فى المثال 5-1 رقبة لها قطر 1 بوصة، وطول 1.5 بوصة (ارجع للشكل 5-12). عند أى تردد يكون الدورق فى حالة رنين؟

الحل

دعنا أولاً نفرض أن تردد الرنين يكون منخفض بحيث يكون طول الرقبة l' صغيراً مقارنة مع $\frac{\lambda}{16}$

. ثم، لأن الهواء فى الرقبة غير محصور، فإنها ستكون كتلة صوتية.

$$M_A = \frac{\rho_o(l'+0.85a+0.61a)}{\pi a^2}$$
$$= 1.19\left[\frac{0.0381+1.46\times 0.0127}{\pi(0.0127)^2}\right] = 133\,\text{kg/m}^4$$

تكون السرعة الحجمية خلال رقبة الدورق مثل سرعة للهواء الداخل للتجويف الداخلى. بالتالى، يكون العنصرين على التوالى وسوف يرن الدورق عند،

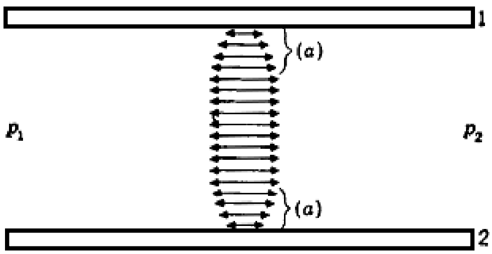
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_A C_A}} = \frac{10^4}{2\pi\sqrt{133\times 5.89}} = 57 \quad \text{Hz}$$

5-7 المقاومة الصوتية

أى جهاز يحدث فيه تدفق للغاز فى نفس طور الضغط ويتناسب التدفق تناسب طردى مع الضغط المطبق يمكن تمثيله بعنصر مقاومة صوتية نقيه. بمعنى أخر، لا توجد طاقة (مفاعلية) مختزنة تصاحب التدفق. توجد أربعة أشكال أساسية للمقاومة الصوتية شائعة الاستخدام فى الأجهزة الصوتية هى: حاجبات (الشاشات) الدقيقة – المشبكة المصنوعة من المعدن أو النسيج، أنابيب الثقوب - الصغيرة، الشقوق الضيقة، والمواد الصوتية المسامية.

تستخدم الشاشات فى أغلب الأحيان فى محولات الطاقة الصوتية لأنها رخيصة الثمن، سهلة الاختيار والتحكم فى التصنيع، الاستقرارية المرضية، والخلو النسبى من المفاعلة الحثية. تستخدم الشقوق فى أغلب الأحيان عندما يكون مطلوب مقاومة قابلة للضبط. يتم عمل هذا عن طريق تغيير عرض الشق. عيب الأنابيب هو أنها إن لم يكن قطرها صغير جداً، الأمر الذي بدوره يؤدى إلى مقاومة عالية، فإنها تكون مصحوبة فى العادة بوجود مفاعلة حثية ملحوظة. لكن، عندما يكون مطلوب مجموعة من مقاومة ومحاثة كهربية، فإنها تكون مفيدة. سوف يتم معالجة مثل تلك المجموعات لاحقاً فى هذا الجزء. فى العادة، يتم استخدام المواد الصوتية المسامية أو الليفية، السيراميك المسامى، والمواد المتلبدة (المتكلسة) فى التطبيقات الصناعية وتكون عبارة خليط من الكتلة والمقاومة. فى كل الأشكال الأربعة من المقاومة الصوتية، تحدث التأثيرات الاحتكاكية التى تولد مقاومة بنفس الأسلوب.

فى الشكل 5-13، نرى الجوانب المقابلة 1 و 2 للشق أو الأنبوبة أو لشبيكة واحدة من شاشة. يسبب اختلاف الضغط المتناوب ($p_2 - p_1$) حركة لجزيئات الهواء في الفضاء بين الجوانب 1 ، 2. عند 1 و 2 فإن جسيمات الهواء المتصلة مع الجوانب يجب أن تبقى ساكنة. فى منتصف المسافة بين الجانبين سوف تحدث أقصى سعة للحركة. يحدث فقد احتكاكي فى الغاز حيثما تتحرك الطبقات المتجاورة فوق بعضها بسرعات مختلفة. بالتالى، يحدث فقد احتكاكي فى المثال المبين فى الشكل 5-13 بالقرب من كل جدار كما هو مشار إلية بالحرف (a). فى أى أنبوبة، شق، شبيكة، أو فجوة يصبح الفقد ملحوظاً عندما تختلف سرعة الطبقات المتجاورة الممتدة على كامل الفضاء.



(a) المناطق التى يحدث فقد لزج فيها

الشكل 5-13 مخطط يبين تلاشى سعة اهتزاز جسيمات الهواء فى موجة الصوت بالقرب من السطح. تبين الحروف (a) المناطق التى يحدث فيها فقد.

<u>الحاجبات (الشاشات).</u>

يبين الجدول 5-4 المقاومات النوعية الصوتية لتنوع من أحجام الشبكة الشائع التصنيع فى الولايات المتحدة الأمريكية. يتم الحصول على المقاومة الصوتية بقسمة قيم Z_s فى هذا الجدول على مساحة

الشاشة المأخوذة فى الاعتبار. يتم تعيين المقاومات الصوتية للشاشات بشكل عام بالفحص وليس بالحسابات.

أنبوبة بقطر صغير جداً [$a\,(\text{meters}) < 0.002/\sqrt{f}$] [7]

تعطى المعاوقة الصوتية للأنبوبة ذات القطر الصغير جداً، بإهمال تصحيحات النهاية، بالعلاقة،

$$Z_A = \frac{8\eta\, l}{\pi\, a^2} + j\frac{4}{3} M_A\, \omega \qquad \text{newton}-\text{sec/m}^5 \qquad 5\text{-}48$$

$$M_A = \frac{\rho_o\, l}{\pi\, a^2} \qquad \text{kg/m}^4 \qquad 5\text{-}49$$

الجدول 5-4 المقاومة النوعية الصوتية لشاشات أحادية الطبقة.

No. of wires per linear in.	Approx. diam of wire, cm	R_S, rayls, dyne-sec/cm³	R_S, mks rayls, newton-sec/m³
30	0.033	0.567	5.67
50	0.022	0.588	5.88
100	0.0115	0.910	9.10
120	0.0092	1.35	13.5
200	0.0057	2.46	24.6

حيث η معامل اللزوجة. بالنسبة للهواء $\eta = 1.86\times10^{-5}$ newton – sec/m^2 عند 20^{o}C و 0.76 m Hg. تتغير هذه القيمة مع درجة الحرارة، بمعنى أن $\eta\,\alpha\,T^{0.7}$، حيث T بالدرجة المطلقة (الكلفن)، l طول الأنبوبة بالمتر، a نصف قطر الأنبوبة بالمتر، M_A الكتلة الصوتية للهواء فى الأنبوبة بالكيلوجرام/م^4، و ρ_o كثافة الغاز بالكيلوجرام/م^3.

يمكن إيجاد المعاوقة الميكانيكية للأنبوبة الصغيرة جداً بضرب المعادلة 5-48 فى $(\pi a^2)^2$، وبالتالى نحصل على،

$$Z_M = 8\pi\eta\, l + j\frac{4}{3} M_M\, \omega \qquad 5\text{-}50$$

حيث $M_M = \rho_o \pi\, a^2\, l$ كتلة الهواء فى الأنبوبة بالكيلوجرام.

الشق الضيق $[t\,(\text{meters}) < 0.003/\sqrt{f}\,]$[8]

تعطى المعاوقة الصوتية لشق ضيق جداًً، بإهمال تصحيحات النهاية، بالعلاقة،

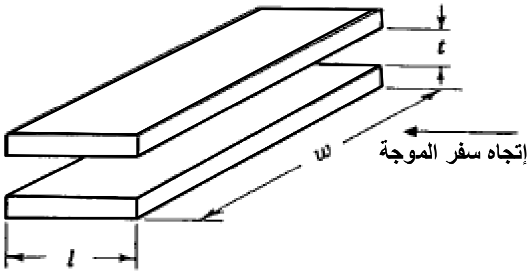
$$Z_A = \frac{12\eta l}{t^3 w} + j\frac{6\rho_o l\omega}{5wt} \quad \text{newton} - \text{sec/m}^5 \qquad 5\text{-}51$$

حيث l طول الشق بالمتر فى الاتجاه الذي تسافر فيه الموجة (أرجع للشكل 5-14)، w عرض الشق بالمتر كما يرى من الاتجاه الذي تأتى منه الموجة، و t سمك الشق بالمتر (أرجع للشكل 5-14).

يمكن إيجاد المعاوقة الميكانيكية للشق الضيق جداًً بضرب المعادلة 5-51 فى t^2w^2، وبالتالى نحصل على،

$$Z_M = \frac{12\eta\, lw}{t} + j\frac{6}{5}M_M\,\omega \qquad 5\text{-}52$$

حيث $M_M = \rho_o lwt$ كتلة الهواء فى الشق بالكيلوجرام.



الشكل 5-14 أبعاد الشق الضيق.

المثال 5-3

مقاومة صوتية 1 أوم صوتى مطلوبة لتعمل كعنصر توهين فى سماعة أذن. أختر الحاجب وقطر الفتحة اللازمة لتحقيق هذه المقاومة.

الحل

كمقاومة مطلوبة لسماعة أذن، يجب أن تكون المقاومة صغيرة نسبياً. فإذا أخترنا حاجب 200 – شبيكة (ارجع للجدول 5-4) فإن المقاومة الصوتية لوحدة المساحة تكون 2.46 رايليى. تكون المساحة S المطلوبة لواحد أوم صوتى على النحو،

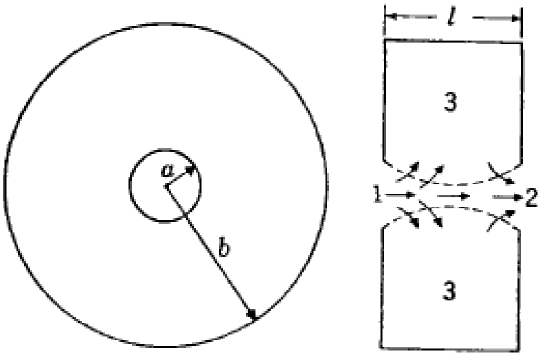
$$S = \frac{1}{2.46} = 0.406 \ \ \text{cm}^2$$

يكون القطر d اللازم للفتحة المطلوبة لهذه المساحة هو،

$$d = 2a = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} = 0.72 \ \text{cm}$$

8-5 تجويف مع فتحات على الجانبين المتقابلين. عنصر خليط كتلة – مطاوعة.

يبين الشكل 5-15حالة خاصة لعنصر يصادف كثيراً فى الأجهزة الصوتية والذي يؤدى فى أغلب الأحيان إرباك فى التحليل. تخيل أن هذه الحالة تكون عنصر على شكل - كعكة، وكل جانب منه له فتحة نصف قطرها a محفورة فيه. عندما يدخل الهواء المتدفق الفتحة 1 بسرعة حجمية U_1، فإن جسيمات الهواء الموجود على مقربة من الفتحة تتحرك بسرعة حجمية U_1. جزء من هذه السرعة يذهب فى انضغاط الهواء فى الفضاء الأسطواني 3، وجزء منه يظهر كحركة للهواء الذي لم ينضغط بشكل ملحوظ. لقد تمت الإشارة سابقاً إلى أن جزء الغاز الذي ينضغط بدون حركة كبيرة للجسيمات يعالج كمطاوعة.



الشكل 5-15 مثال لعنصر خليط كتلة – مطاوعة متكون من تجويف مع فتحات على الجوانب المتقابلة.

بفحص الشكل 5-15 نرى أن الجزء المرفق تقريبا الخطوط المنقطة يتحرك بدون ضغط مقدر، ولذلك، فهو كتلة صوتية. الجزء الواقع خارج الخطوط المنقطة يكون مطاوعة صوتية. يبين الشكل 5-16 الدائرة المناظرة لهذا الجهاز الصوتى. تنقسم السرعة الحجمية U_1 الداخلة للفتحة 1 إلى جزئين، جزء لعمل انضغاط للهواء (U_3) والجزء الأخر (U_2) لمغادرة الفتحة 2. بالتقدير المتعقّل نصل إلى قيم M_A. إذا كان الطول l للأسطوانة طويل حقاً و كان الحجم 3 كبير، فإن M_A تكون

مجرد تصحيح النهاية l'' للمعادلة 5-44. إذا كان الحجم 3 صغيراً، فإن M_A تصبح تقريباً هى الكتلة الصوتية للأنبوبة ذات نصف القطر a والطول $l/2$. تتعين المطاوعة الصوتية بواسطة حجم الهواء الواقع خارج الخطوط المنقطة المقدرة فى الشكل 5-15.

5-9 أنبوبة متوسطة الحجم = عنصر خليط كتلة – مقاومة [9] $[a > 0.01\sqrt{f}$ و $a < 10/f]$.

المعاوقة الصوتية للأنبوبة ذات نصف القطر a (بالمتر) الذي يكون أقل من $0.002/\sqrt{f}$ أعطيت بالمعادلات 5-48 و 5-49. هنا، سوف نعطى المعاوقة الصوتية للأنبوبة الذي يكون نصف قطرها أكبر من $0.01/\sqrt{f}$ ولكن ما تزال أقل من $10/f$. بالنسبة للأنبوبة التى يقع نصف قطرها بين $0.002/\sqrt{f}$ و $.01/\sqrt{f}$ يجب استخدام الاستكمال من البيانات المعلومة. المعاوقة الصوتية للأنبوبة المتوسطة الحجم تعطى بالعلاقة التالية،

$$Z_A = R_A + j\omega M_A \qquad 5\text{-}53$$

حيث

$$R_A = \frac{1}{\pi a^2}\rho_o\sqrt{2\omega\mu}\left[\frac{l'}{a} + (2)\right] \quad \text{mks acoustic ohms} \qquad 5\text{-}54$$

$$M_A = \frac{\rho_o[l' + (2)l'']}{\pi a^2} \quad \text{kg/m}^4 \qquad 5\text{-}55$$

و a نصف قطر الانبوبة بالمتر، ρ_o كثافة الهواء كجم/م^3، μ المعامل الحركى للزوجة. بالنسبة للهواء عند 20^oC و 0.76 m Hg، $\mu \approx 1.56 \times 10^{-5}$ m^2/sec . تتغير هذه الكمية بمقدار $T^{1.7}/P_o$ حيث T بالكلفن و P_o الضغط الجوى. l' الطول الفعلى للأنبوبة و l'' تصحيح النهاية للأنبوبة، ويعطى بالمعادلة 5-44 أنه إذا كانت الأنبوبة مشفهة (لها حافة بارزة) أو بالمعادلة 5-46 إذا كانت الأنبوبة غير مشفهة . يجب استخدام العدد (2) فى الأقواس فى المعادلات 5-54 و 5-55 إذا كانت كلتا نهايتى الأنبوبة مأخوذتا فى الاعتبار. إذا تم اعتبار نهاية واحدة، يتم استبدال العدد (2) بالعدد 1. ω هو التردد الزاوى بوحدات قطرى لكل ثانية.

5-10 صفيحة مثقبة–عنصر خليط كتلة–مقاومة [9]. $[a > 0.01/\sqrt{f}$ و $a > 10/f]$.

مرات كثيرة، يتم استخدام الصفائح المثقبة كعناصر خليط صوتية. سوف نفترض صفيحة مثقبة

بالأبعاد المبينة فى الشكل 5-17 والثقوب لها مراكز تبعد عن بعضها البعض بمسافة أكبر من قطر الثقب. فى هذه الحالة تعطى المعاوقة الصوتية لكل مساحة b^2 (أى لكل ثقب) بالعلاقة،

$$Z_A = R_A + j\omega M_A$$

حيث

$$R_A = \frac{1}{\pi a^2}\rho_o\sqrt{2\omega\mu}\left[\frac{t}{a} + 2(1-\frac{A_h}{A_b})\right] \quad \text{mks acoustic ohms} \qquad 5\text{-}56$$

$$M_A = \frac{\rho_o}{\pi a^2}[t + 1.7a(1-\frac{a}{b})] \quad \text{kg/m}^4 \qquad 5\text{-}57$$

و $A_h = \pi a^2$ مساحة الثقب بالمتر المربع، $A_b = b^2$ مساحة دورة كل ثقب بالمتر المربع، و t سمك الصفيحة بالمتر .

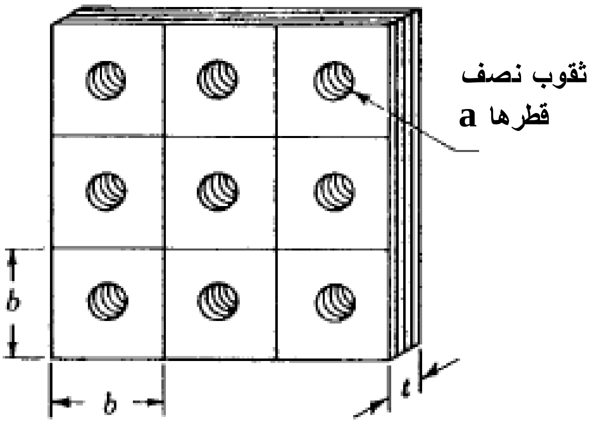
إذا كان عدد الثقوب هو n، فإن المعاوقة الصوتية تساوى تقريباً $\frac{1}{n}$ قدر مساحة ثقب واحد. وإذا تم استخدام عنصر الكتلة – المقاومة هذا مع مطاوعة لتكوين دائرة رنين، فإننا نهتم فى أغلب الأحيان بالنسبة بين التردد الزاوى للرنين ω_o و عرض الشريط الزاوى w (بوحدات قطرى لكل ثانية) مقاس عند نقط نصف القدرة. تسمى هذه النسبة بالمعامل " Q" للدائرة (على غرار ما يسمى فى الإلكترونية بمعامل الجودة Q، المترجمون). تعتبر هذه النسبة مقياس لحدة منحنى الرنين.

المعامل " Q_A " للصفيحة المثقبة عندما تستخدم مع مطاوعة ذات حجم يولد رنين عند التردد الزاوى ω_o يكون على الصورة،

$$Q_A = \frac{\omega_o M_A}{R_A} = \sqrt{\frac{\omega_o}{2\mu}}\, a\, \frac{t + 1.7a[1-(a/b)]}{t + 2a[1-(\pi a^2/b^2)]} \qquad 5\text{-}58$$

لا يعتمد المعامل Q_A على عدد الثقوب فى الصفيحة المثقبة.

نكرر مرة أخرى أن هذه العلاقات تقتصر على الحالات التى تكون المسافة الفاصلة بين مراكز الثقوب أكبر من القطر (أى $b > 2a$).



الشكل 5-17 صفيحة رقيقة مثقبة بثقوب نصف قطرها a وطولها t
والمسافة الفاصلة بين مراكزها b.

5-11 المحولات الصوتية.

كما فى حالة العناصر الصوتية الأخرى، لا يوجد شكل أو ترتيب للمواد التى سوف تعمل كمحول متجمع (مدمج) على مدى عريض من الترددات. أيضاً، إن الذي قد يبدو كمحول صوتى عندما تكتب المعاوقات كمعاوقات ميكانيكية قد لا يبدو كذلك عندما تكتب كمعاوقات صوتية، والعكس بالعكس صحيح. كمثال لهذه الحالة، دعنا نفحص حالة التوقف (اللا-اتصال) البسيط فى أنبوبة تحمل موجة صوتية.

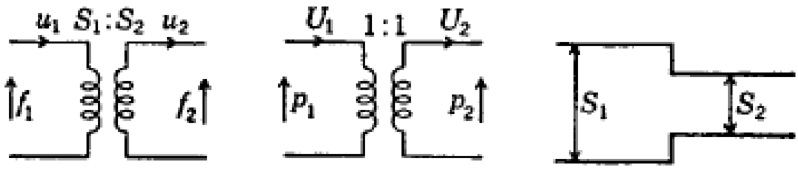
<u>وصلة من أنبوبتين ذات مساحات مختلفة.</u>

إن وصلة من أنبوبتين ذات مساحات مختلفة تكافئ عدم اتصال فى مساحة أنبوبة منفردة (ارجع للشكل 5-18أ). إذا افترضنا أن قطر الأنبوبة الأكبر يكون أقل من $\lambda/16$، حينئذ يمكننا كتابة المعادلتين التاليتين اللتان تربطان الضغط مع السرعات الحجمية عند الوصلة:

$$p_1 = p_2 \qquad 5\text{-}59$$

$$U_1 = U_2 \qquad 5\text{-}60$$

المعادلة 5-59 تنص على أن ضغط الصوت على كلا جانبى الوصلة يكون متساوياً (أى أن الضغط يكون متصل). تنص المعادلة 5-60 على أن حجم الهواء المغادر لأحد الأنابيب فى فترة زمنية يساوى الحجم الداخل للأنبوبة الأخرى فى نفس الفترة الزمنية. تكون نسبة التحويل للمعاوقة الصوتية هى الوحدة لذلك لا توجد حاجة للمحول.



(ج) (ب) (أ)

الشكل 5-18 (أ) عدم اتصال بسيط بين أنبوبتين، (ب) تمثيل محول طاقة معاوقة – صوتية للشكل (أ)، وحيث أن نسبة التحويل تساوى الوحدة فإنه لا حاجة للمحول، (ج) تمثيل محول طاقة معاوقة – ميكانيكية للحالة (أ).

فى حالة الدائرة التى تستخدم عناصر ميكانيكية متجمعة يظهر توقف (انفصال) على هيئة محول بنسبة لفات $S_1 : S_2$ لأنه من المعادلة 5-59

$$\frac{f_1}{S_1} = \frac{f_2}{S_2} \qquad 5\text{-}61$$

ومن المعادلة 5-60 نحصل على،

$$u_1 S_1 = u_2 S_2 \qquad 5\text{-}62$$

حيث f_1 و f_2 هما القوى على جانبى الوصلة و u_1 و u_2 هما السرعات المتوسطة للجسيمات على طول المساحات S_1 و S_2. نحصل على،

$$f_1 = \frac{S_1}{S_2} f_2 \qquad 5\text{-}63$$

و

$$u_2 = \frac{S_1}{S_2} u_1 \qquad 5\text{-}64$$

بالتالى،

$$Z_{M1} = \frac{f_1}{u_1} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 \frac{f_2}{u_2} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 Z_{M2} \qquad 5\text{-}65$$

فى هذه الحالة يلزم محول ويتم رسمه كما هو مبين فى الشكل 5-18ج.

يجب ملاحظة أن الموجة المنعكسة سوف ترسل للخلف نحو المصدر بواسطة توقف بسيط. رأينا فى الجزء الرابع أنه، لكي لا تكون هناك أي موجة منعكسة، فإن المعاوقة النوعية الصوتية في الإنبوبة

الثانية (p_2/u_2) يجب أن تساوي المعاوقة النوعية الصوتية في الأنبوبة الأولى (p_1/u_1). يكون ذلك ممكن فقط عندما تكون $S_1 = S_2$، بمعنى، عندما لا يوجد توقف.

للحصول على مقدار وطور الموجة المنعكسة فى الأنبوبة الأولى الناتجة عن التوقف، يجب علينا استخدام مادة من الجزء الرابع. بفرض أن التوقف موجود عند $x = 0$، فإن المعاوقة النوعية الصوتية فى الأنبوبة الأولى تكون

$$Z_{S1} = \frac{p_1}{u_1} \qquad \text{5-66}$$

إذا كانت الأنبوبة الثانية لانهائية الطول، فإن المعاوقة النوعية الصوتية لها عند الوصلة سوف تكون،

$$Z_{S2} = \frac{p_2}{u_2} = \rho_o c \qquad \text{5-67}$$

(أرجع للمعادلة 2-60). المعاوقة Z_{S1} عند الوصلة تكون، من المعادلات 5-59 و 5-64،

$$Z_{S1} = \frac{p_1}{\dfrac{S_2 u_2}{S_1}} = \frac{p_2}{\dfrac{S_2 u_2}{S_1}} \qquad \text{5-68}$$

من المعادلات 5-67 و 5-68 نحصل على،

$$Z_{S1} = \frac{S_1}{S_2} = \rho_o c \qquad \text{5-69}$$

باستخدام المعادلات 2-37 و 2-58، وبوضع $x = 0$، يمكن الحل لـ ج م م الموجة المنعكسة p_- بدلالة الموجة الساقطة p_+ نحصل على،

$$p_1 = p_+ + p_- \qquad \text{5-70}$$

$$u_1 = \frac{1}{\rho_o c}(p_+ - p_-) \qquad \text{5-71}$$

$$\frac{p_1}{u_1} = \frac{S_1}{S_2}\rho_o c = \rho_o c \frac{p_+ + p_-}{p_+ - p_-} \qquad \text{5-72}$$

$$p_- = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} p_+ \qquad 5\text{-}73$$

ضغط الصوت p_r للموجة المنتقلة فى الأنبوبة الثانية عند نقطة الوصلة يجب أن يساوى ضغط الصوت فى الأنبوبة الأولى عند نفس النقطة،

$$p_r = p_+ + p_- \qquad 5\text{-}74$$

بالتالى،

$$p_r = \frac{2S_1}{S_1 + S_2} p_+ \qquad 5\text{-}75$$

إذا كان $S_1 = S_2$ ، فإنه لا يوجد موجة منعكسة p_- وحينئذ $p_+ = p_r$.

لاحظ أيضاً أنه إذا أصبح S_2 صغير جداً، فإن هذه الحالة تطابق حالة النهايات الصلبة عند الوصلة. فى هذه الحالة،

$$p_- = p_+ \qquad 5\text{-}76$$

و

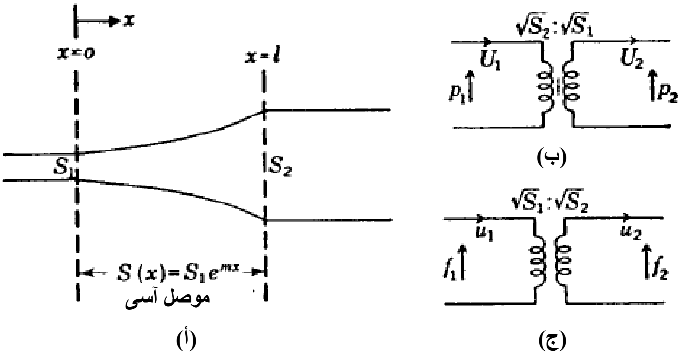
$$p_+ + p_- = 2p_+ \qquad 5\text{-}77$$

تبين هذه المعادلة الحالة المذكورة فى أغلب الأحيان مضاعفة الضغط. بمعنى أنه، عندما تنعكس موجة صوتية مستوية من سطح صلب مستوى، فإن ضغط الصوت عند السطح يكون ضعف ضغط الموجة الساقطة.

أنبوبتان لهما مساحات مختلفة ومتصلتان بموصل آسى[10].

يمكن استخدام موصل أسى للوصل بين أنبوبتين لهما مساحات مقطع مختلفة. يعمل مثل هذا الموصل (ارجع للشكل 5-19) كتوقف بسيط عندما يكون طوله قصير مقارنة مع الطول الموجى ويعمل كمحول للمعاوقة الصوتية عندما يكون طوله أكبر من الطول الموجى. إذا كانت الأنبوبة لانهائية الطول، حينئذ عند $x = l$ (ارجع إلى الشكل 5-19) نحصل على،

$$\frac{p_2}{u_2} = \rho_o c \qquad 5\text{-}78$$



الشكل 5-19 (أ) موصل آسى بين أنبوبتين، (ب) تمثيل تردد-عالى للشكل (أ) باستخدام محول طاقة صوتى – معاوقي، و (ج) تمثيل تردد-عالى للشكل (أ) باستخدام محول طاقة ميكانيكى – معاوقي.

إذا كانت مساحة المقطع للموصل الآسى على الصورة،

$$S(x) = S_1 e^{mx} \qquad 5\text{-}79$$

وطول الموصل l، حينئذ فإن المعاوقة النوعية الصوتية عند $x=0$ تكون،

$$Z_{S1} = \frac{p_1}{u_1} = \rho_o c \frac{\cos(bl+\theta) + j\sin(bl)}{\cos(bl-\theta) + j\sin(bl)} \qquad 5\text{-}80$$

حيث $b = \frac{1}{2}\sqrt{(4\omega^2/c^2) - m^2}$ meters^{-1}، m ثابت الشفة (الجزء العريض من فتحة البوق) بالمتر$^{-1}$ (ارجع للمعادلة 5-79)، $\theta = \tan^{-1}(m/2b)$، c سرعة الصوت بالمتر لكل ثانية، l طول الموصل الآسى بالمتر، ρ_o كثافة الهواء بالكيلوجرام لكل متر مكعب.

عند الترددات المنخفضة (b تكون تخيلية و l/λ تكون كبيرة) نحصل على،

$$\frac{p_1}{U_1} = \frac{p_2}{U_2} \qquad or \qquad Z_{A1} = Z_{A2} \qquad 5\text{-}81$$

و عند الترددات المرتفعة (b تكون حقيقية و $l/\lambda > 1$) ونحصل على،

$$\frac{p_1}{u_1} = \frac{p_2}{u_2} \qquad 5\text{-}82$$

أو

$$Z_{A1} = \frac{S_2}{S_1} Z_{A2} \qquad 5\text{-}83$$

عند الترددات المتوسطة فإن المحول يدخل إزاحة طور، وتتغير نسبة المحول (التحويل) بين حدود توضع بواسطة المعادلتين السابقتين.

من المعادلة 5-83 تكون نسبة التحويل للمعاوقة الصوتية عند الترددات العالية على الصورة $\sqrt{S_2 / S_1}$ (ارجع للشكل 5-19ب). بمعنى أنه،

$$Z_{A1} = \left(\sqrt{\frac{S_2}{S_1}} \right)^2 Z_{A2} \qquad 5\text{-}84$$

بالنسبة للمعاوقة الميكانيكية عند الترددات العالية فإن نسبة التحويل ترى من المعادلة 5-83 وتكون على الصورة $\sqrt{S_1 / S_2}$ (ارجع للشكل 5-19ج). بمعنى أنه،

$$Z_{M1} = \left(\sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \right)^2 Z_{M2}$$

المثال 5-4

مطلوب عمل رنين فى صندوق سماعة صوتية ذات انعكاس تمييز ترددى عند 100 هيرتز وذلك بحفر عدد من الفتحات فيه. للصندوق حجم يساوى قدم واحد مكعب وسمك جدار نصف بوصة. عين حجم وعدد الفتحات المطلوبة، بفرض أن $Q_A = 4$ والنسبة بين قطر الفتحة و الفاصل بين المراكز تساوى 0.5.

الحل

من المعادلة 5-58 بالتقريب نرى أن،

$$Q_A \approx \frac{a\sqrt{\omega_o}}{(0.00395)\sqrt{2}}$$

$$a = \frac{(4)(0.00395)\sqrt{2}}{\sqrt{628}} = 0.000893 \text{ m}$$

بالتالى يكون قطر الفتحة بالبوصة تساوى $2a / 0.0254 = 0.0703 \text{ in}$.

مفاعلة الصندوق عند الرنين تساوى،

$$X_B = \frac{1}{\omega_o C_A} = \frac{\gamma P_o}{628V} = \frac{1.4\times 10^5}{628\times 0.02832} = 7880 \text{ mks acoustic ohms}$$

تكون الكتلة الصوتية المطلوبة هى،

$$M_A = \frac{X_B}{\omega_o}\frac{7880}{628} = 12.55 \text{ kg/m}^4$$

إذا وجد عدد n من الفتحات، فإن الكتلة الصوتية لكل فتحة تساوى،

$$nM_A = n(12.55) \text{ kg/m}^4$$

من المعادلة 5-57 نحصل على،

$$n\,(12.55) = \frac{1.18}{\pi(0.000893)^2}[0.0125 + (0.00152)(0.783)]$$

$$n = \frac{(1.18)(0.0137)}{\pi(12.55)(8\times 10^{-7})} \approx 510 \text{ holes}$$

المثال 5-5

صمم قطاع T مفرد لمرشح موجة تمرير-منخفض ثابت - k له تردد قطع 100 هيرتز و معاوقة التصميم تساوى 10^3 mks acoustic ohms.

الحل

القطاع T المفرد من هذا النوع يتبين فى الأشكال 5-15 و 5-16 ما عدا أن الكتل الصوتية لقطاع واحد لها القيم $M_A/2$ لأن كل M_A يجب أن تعمل ككتلة صوتية كلتاهما للقطاع موضع السؤال والقطاع المجاور. من التعريف، تردد القطع يكون،

$$f_o = \frac{1}{\pi\sqrt{M_A C_A}}$$

معاوقة التصميم تكون مساوى لـ

$$R_o = \sqrt{\frac{M_A}{C_A}}$$

من هاتين المعادلتين يمكن الحل بالنسبة C_A و M_{A1} نجد أن،

$$M_A = \frac{1}{\pi^2 f_o^{\,2} C_A} = C_A R_o^{\,2}$$

بالتالى

$$C_A = \frac{1}{\pi\, f_o\, R_o} = \frac{1}{\pi \times 100 \times 10^2} = 3.18 \times 10^{-6}\ \text{m}^5/\text{newton}$$

$$M_A == 3.18 \times 10^{-6} \times 10^6\ \text{kg/m}^4$$

من الفقرة 5-8 والمعادلة 5-55 عند $l' = 0$، نحصل على حجم الفتحة فى الجهاز الموجود فى الشكل 5-15.

$$M_A = \frac{\rho_o (0.85a)}{\pi\, a^2}$$

$$\frac{(1.7)(1.18)}{\pi\, a} = 3.18$$

$$a = 0.2\ \ \text{m}$$

قطر الفتحة يكون 0.4 متر. يكون حجم التجويف،

$$V = C\gamma P_o = 1.4 \times 3.18 \times 10^{-6} \times 10^5 = 0.445\ \ m^3$$

بذلك تتعين عناصر القطاع.

مراجع هذا الباب

1- 1- P. M. Morse, 'Vibration of Sound," 2nd ed., pp. 326-340, McGraw-Hill Book Company, Inc, New York, 1948.

2- L.E. Kinsler and R. Frey, "Fundamental of Acoustic," pp. 187-195, John Wiley & Sons, Inc., 1950.

3- 3- P. M. Morse, 'Vibration of Sound," 2nd ed., pp. 447, McGraw-Hill Book Company, Inc, New York, 1948.

4- G. N. Watson, "Theory of Bessel Functions", Cambridge University Press, London, 1922.

5- H. Levine and J. Schwinger, On the Radiation of Sound from an Unflanged Circular Pipe, Phys. Rev., 73, 383-406, (Feb. 15 1948).

6- H. Levine, On the Relation between the Sound Fields Radiated and Diffracted by Plane Obstacles, J. Acoust. Soc. Amer., 23: 697-700 (1951).

7- Lord Rayleigh, " Theory of Sound, " 2nd ed., Vol. II, pp. 323-328, Macmillan & Co., Ltd., Londen, 1929. Also see L.L. Beranek, "Acoustic Measurements", pp. 187-186, John Wiley &Sons, Inc., New York, 1949.

8- I.B. Crandall, "Vibration Systems and Sounds," D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1926.

9- U. Ingard, "Scattering and Absorption by Acoustic Resonators, "doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1950, and J. Acoust. Soc. Amer., 25: 1044-1045 (1953)

10- H. F. Olson, "Elements of Acoustical Engineering," 2nd ed. pp. 109-111, D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1947.

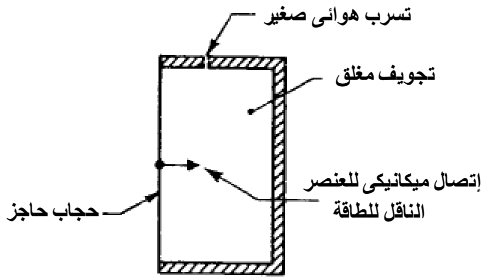
الباب السادس

الميكروفونات

MICROPHONES

الجزء الرابع عشر – السمات العامة للميكروفونات.

الميكروفونات هي محولات طاقة لتحويل الطاقة الصوتية إلى طاقة كهربية. تخدم الميكروفونات غرضين أساسيين. الأول، أنها تستخدم لتحويل الموسيقى أو الحديث إلى إشارات كهربية تبث أو تعالج بأسلوب أو بآخر ومن ثم يتم إعادة إنتاجها. الثاني، أنها تخدم كأدوات قياس، تحول الإشارات الصوتية إلى تيارات كهربية تشغل مقاييس البيان. في بعض التطبيقات مثل التيليفون، يكون للناتج الكهربي العالي، والكلفة المنخفضة والمتانة اعتبار أعظم من جودة إعادة الإنتاج الصوت. في تطبيقات أخرى، يكون صغر الحجم والجودة العالية أكثر أهمية من الحساسية العالية وانخفاض الكلفة. في تطبيقات القياس ربما نكون مهتمين بتعيين ضغط الصوت أو سرعة الجسيم. في بعض التطبيقات، يجب أن يعمل الميكروفون بدون تغير كبير في السمات المميزة بغض النظر عن التغير الكبير في درجة الحرارة والضغط الجوي.



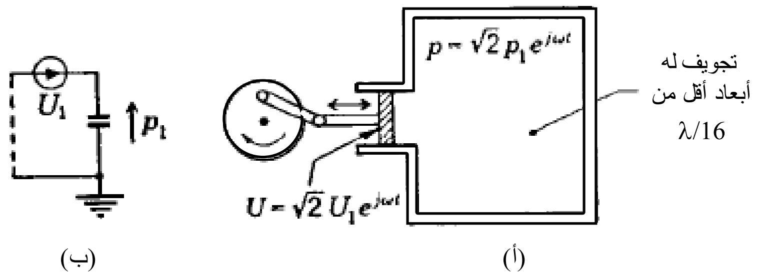
الشكل 1.6 مخطط لميكروفون يعمل بالضغط ويتكون من وعاء صلب، يوجد في أحد جانبيه حاجز مرن متصل مع العنصر الناقل للطاقة.

لهذه التطبيقات المختلفة، تم تطوير ميكروفونات متنوعة. ولغرض المناقشة تم تقسيم الميكروفونات في هذا الجزء إلى ثلاثة فئات واسعة في كل منها يوجد عدد من التصاميم البديلة. هذه الفئات هي: 1- ميكروفونات الضغط (الميكروفونات الضغطية)، 2- ميكروفونات منحدر-

الضغط، و3ـ مجموعات من الصنفين السابقين. في هذا لجزء سوف نصف السمات المميزة لهذه الأنواع الثلاثة. في الجزئين التاليين سوف نناقش بالتفصيل العديد من الأمثلة لكل نوع بما فيها أنواع محولات الطاقة (نواقل الطاقة) الكهرومغناطيسية، الكهروستاتيكية والكهروضغطية.

1ـ6 ميكروفونات الضغط

ميكروفون الضغط هو الميكروفون الذي يستجيب للتغيرات في الضغط الصوتي. المثال الشائع لهذا النوع هو ميكروفون الحجاب الحاجز (الغشاء)، والذي ينتهي جانبه الخلفي في تجويف مغلق (الشكل 6ـ1). تحفظ الفتحة الدقيقة الموجودة خلال جدار التجويف متوسط الضغط داخل التجويف عند الضغط الجوي. لكن، تسبب التغيرات المفاجئة في الضغط، مثل التغيرات المتولدة بواسطة موجة الصوت، حركة للحجاب الحاجز للأمام وإلى الخلف.



الشكل 6ـ2 مخطط لغرفة الضغط.

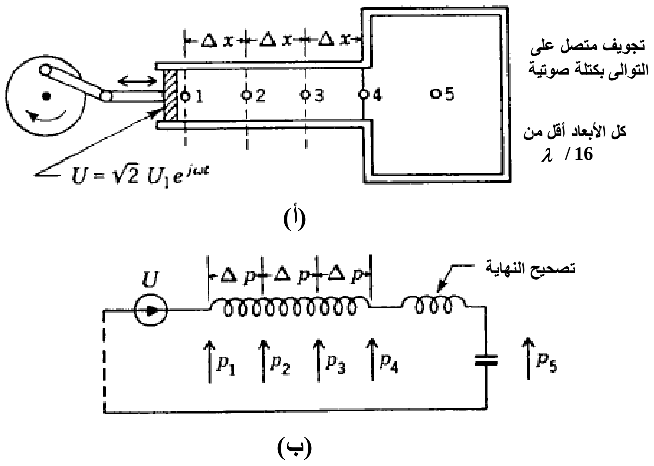
إذا وضع الميكروفون الضغطي في تجويف صغير يتغير فيه الضغط، مثل المبين في الشكل 6ـ2، فإن جهد الخرج سوف يبقى كما هو بغض النظر عن المكان الذي يحتله الميكروفون في التجويف. على الجانب الأخر، إذا وضع الميكروفون الضغطي عند النقط المتتالية 1، 2، 3، و4 في الشكل 6ـ3أ، فإنه سوف يستجيب بشكل مختلف عند كل نقطة من تلك النقط للأسباب التي يمكن أن ترى من الشكل 6ـ3ب. تختلف هبوطات الضغط p_1 ، p_2 ، p_3 ، و p_4 كل منها عن الأخر بمقدار Δp ، إذا كانت المسافة الفاصلة Δx متساوية.

إذا تم وضع ميكروفون ضغطي في موجة صوتية مستوية ذات شدة ثابتة I (مقدار الواط المتدفق خلال وحدة المساحات في صدر الموجة المستوية)، فإن القوة التي تعمل على تحرك الحاجز سوف لا

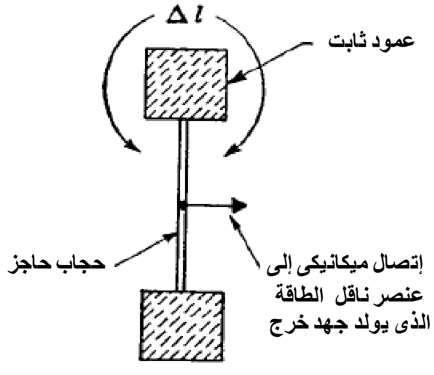
تعتمد على التردد لأن $p = \sqrt{I \rho_o c}$ (ارجع الى المعادلة 2ـ88).

2ـ6 ميكروفونات منحدر – الضغط

ميكروفون منحدر – الضغط (الضغطـالمتدرج) هو الميكروفون الذي يستجيب لفرق الضغط عند نقطتين متقاربتين. المثال الشائع لهذا النوع من الميكروفونات له حجاب حاجز، يتعرض كل من جانبيه للموجة الصوتية. يبين الشكل 6ـ4 مثل هذا التركيب.



الشكل 6ـ3 مخطط لترتيب يكون الضغط فيه متدرج.



الشكل 6ـ4 مخطط لميكروفون منحدرـالضغط يتكون من حاجز متحرك ويتعرض من كلا جانبيه للصوت، ومتصل إلى عنصر محول طاقة.

إذا وضع ميكروفون الضغط ـ المتدرج في التجويف كما بالشكل 6ـ2أ، فإنه سوف لا توجد محصلة قوة تؤثر على الحجاب ويكون خرجة مساويا للصفر. يحدث هذا لأنه لا يوجد تدرج في

الضغط في التجويف. على النقيض، إذا وضع ميكروفون الضغط – المتدرج عند النقط المتتالية 1 إلى 4 في الشكل 6ـ3أ، فإنه سوف يولد جهد خرج يتناسب مع تدرج الضغط $\Delta p / \Delta x$. بمعنى أخر، إذا كانت Δx هي نفسها بين النقط المتتالية، فإن خرج الميكروفون سوف لا يعتمد على ما هي النقطة التي يوضع عندها في الشكل 6ـ3أ.

عند وضع ميكروفون منحدر ـ ضغط صغير جدا في موجة صوتية مستوية تسافر في اتجاه x ، فإن ج م م القوة المركبة f_D التي تعمل على تحريك الحجاب الحاجز سوف تكون على الصورة،

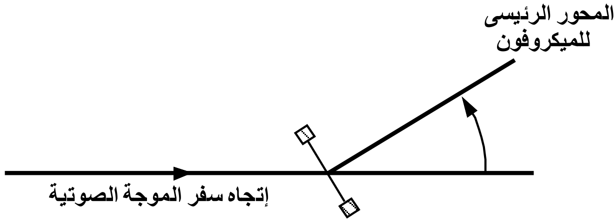
$$f_D = -S \frac{\partial p}{\partial x} \Delta l \cos\theta \qquad 6\text{-}1$$

حيث p ج م م ضغط الصوت، $\frac{\partial p}{\partial x}\cos\theta$ مركبة منحدر الضغط في اتجاه محور x التي تؤثر خلال أوجهه الحاجز، θ الزاوية بين العمودي على الحاجز واتجاه انتقال الموجة (الشكل 6ـ5)، Δl المسافة الفعالة بين جانبي الحاجز (أنظر الشكل 6ـ4)، و S مساحة الحاجز.

تكون معادلة الموجة الصوتية المنتقلة (المعادلة 2ـ57) على الصورة،

$$p = p_o e^{jkx} \qquad 6\text{-}2$$ سلطان

حيث $k = \omega / c$ و p_o ج م م ضغط الصوت عند $x = 0$.



الشكل 6ـ5 ميكروفون ضغط – متدرج يقع محوره الرئيسي عند زاوية θ بالنسبة للاتجاه الذي تتحرك فيه الموجة الصوتية.

إذا افترضنا أن دخول الميكروفون إلى مجال الصوت لا يؤثر في منحدر الضغط، يمكننا التعويض بالمعادلة 6ـ2 في لمعادلة 6ـ1 والحصول على،

$$f_D = \frac{j\, p_o\, \omega S\, \Delta l\, \cos\theta}{c}\, e^{-jkx} \qquad 6\text{-}3$$

يـكون مقدار القوة عند أي نقطة x على النحو،

$$|f_D| = \frac{|p|\omega S\, \Delta l \cos\theta}{c} \qquad 6\text{-}4$$ سلطان

يجب تذكر أنه في الحالة المستقرة (المعادلة 4.2) يتناسب منحدر الضغط مع $j\omega\rho_o$ مضروبة في مركبة سرعة الجسيم في اتجاه المنحدر المأخوذ. لهذا، فإن القوة f_D تتناسب مع سرعة الجسيم عند أي تردد معطى. يـكفي الرجوع إلى الشكل 5.6 للاقتناع بأنه عندما $\theta = 90^o$، فإن القوة المؤثرة على الحجاب الحاجز سوف تساوى الصفر، لأن ظروف التماثل تتطلب أن يـكون نفس الضغط موجود على كلا جانبي الحاجز. من المعادلة 4.6 نرى أيضا أن القوة الفعالة المؤثرة على الحاجز تتناسب مع التردد ومع ج م م ضغط الصوت.

في المحاور الكروية، في حالة ميكروفون له أبعاد تكون صغيرة مقارنة مع r، فإن المعادلة 1.6 تصبح على الصورة،

$$f_D = -S\,\frac{\partial p}{\partial r}\,\Delta l\, \cos\theta \qquad 6\text{-}5$$ سلطان

يمكن إيجاد معادلة الموجة الكروية للصوت من المعادلة 62.2.

$$p = \frac{A_o}{r}\, e^{-jkr} \qquad 6.6$$

بالتعويض بالمعادلة 6.6 في 5.6 نحصل على

$$f_D = \frac{A_o(1 + jkr)}{r^2}\, e^{-jkr}\, S\,(\Delta l\, \cos\theta) \qquad 6\text{-}7$$ سلطان

وهذا يعطى،

$$|f_D|_{rms} = \frac{|p|\omega S\, \Delta l\, \cos\theta}{c}\, \frac{\sqrt{1 + k^2 r^2}}{kr} \qquad 6\text{-}8$$

لكن، نرى من المعادلة 60.2 أنه في الموجة المستوية ج م م السرعة يـكون مرتبط مع ج م م الضغط

بالعلاقة،

$$|u| = \frac{|p|}{\rho_o c}$$ 6-9سلطان

وفي الموجة الكروية (المعادلة 2ـ64) بالعلاقة،

$$|u| = \frac{|p|}{\rho_o c} \frac{\sqrt{1+k^2r^2}}{kr}$$ 6-10

حيث $|u|$ ج م م سرعة الجسيم في اتجاه سفر الموجة الصوتية. بالتالي، فإن المعادلات 6ـ4 و6ـ8 تصبح على الصورة،

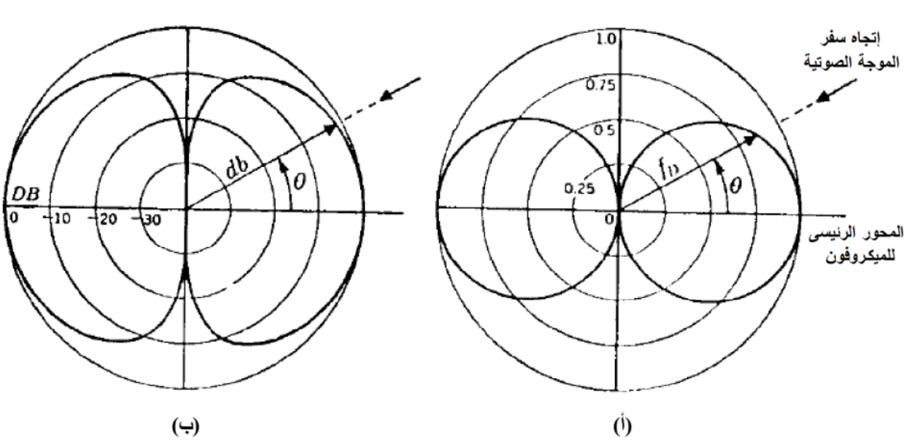
$$|f_D| = |u| \omega \rho_o \, S \, \Delta l \, \cos\theta$$ 6-11سلطان

بمعنى أخر، (جذر متوسط مربعات) القوة الفعالة f_D التي تؤثر على الحجاب الحاجز لميكروفون منحدر-الضغط تتناسب تناسب طردي مع سرعة الجسيم الفعالة في اتجاه انتشار الموجة، ومع التردد، ومع كثافة الهواء، ومع حجم ومساحة الحجاب، والزاوية التي يصنعها مع اتجاه انتشار الموجة الصوتية. إن هذا حقيقي لأي نوع من صدر الموجة، مستوى، كروي، أسطواني، أو أي نوع أخر، بشرط أن يكون الميكروفون صغير بحيث أن وجودة لا يسبب اضطراب للموجة الصوتية.

عند أي تردد معطى، فإن الاستجابة في الميكروفون يتناسب مع $\cos\theta$، التي تولد نموذج التوجيهية المبين في الشكل 6ـ6أ. شاع تسمية هذا الرسم بنموذج "الشكل 8". نفس النموذج، مرسوم بالديسيبل منسوب إلى القوة عند $\theta = 0$، يعطى في الجزء (ب). من الشيق ملاحظة أن النموذج هو نفسه مثل نموذج الزوج الصوتي أو الحاجز (الذي يكون بدون شفة) عند الترددات المنخفضة (ارجع للأشكال 4ـ8 و4ـ13).

تكون الاستجابة الترددية لميكروفون منحدر الضغط (سرعة-الجسيم)، عندما يوضع في الموجة الكروية، دالة في تقوس صدر الموجة. بمعنى أنه، من المعادلة 6ـ10 نرى أنه عندما تكون قيم k^2r^2 ($kr = \omega r / c$) كبيرة مقارنة بالواحد الصحيح فإن سرعة الجسيم ترتبط خطيا مع ضغط الصوت. إن القيمة الكبيرة لـ kr تعنى إما أن التردد عالي أو أن نصف قطر التقوس صغير. لكن،

في حالة قيم k^2r^2 الصغير ومقارنة مع الواحد الصحيح، فإن هذا يعنى إما أن يكون نصف قطر التقوس صغيرا أو أن التردد يكون منخفضا أو كلاهما معا، وأن سرعة الجسيم تتناسب مع $|p|/(\omega r)$. يترتب على ذلك أنه، عندما يتحرك شخص يتحدث أو يغنى بالقرب من ميكروفون المنحدر-الضغطي بحيث r تكون صغيرة فإن صوته يصبح مدويا أو أكثر تمييز للتردد لأن خرج الميكروفون يزداد مع تناقص التردد.



الشكل 6-6 السمات التوجيهية لميكروفون منحدر- الضغط المبين في الشكل 6-4.

6-3 مجموعة ميكروفونات الضغط ومنحدر – الضغط.

إن مجموعة ميكروفون الضغط ومنحدر – الضغط هي المجموعة التي تستجيب لكل من الضغط ومنحدر (تدرج) الضغط في الموجة. المثال الشائع لمثل هذا الميكروفون هو الذي له تجويف عند الجانب الخلفي للحاجز به فتحة إلى الهواء الخارجي ويحتوي على مقاومة صوتية (ارجع للشكل 6-7أ).

يبين الشكل 6-7ب الدائرة المناظرة لهذا الجهاز. بفرض أن ،

$$p_1 = p_o e^{-jkx} \qquad 6\text{-}12$$

$$p_2 = p_1 + \frac{\partial (p_o e^{-jkx})}{\partial x}\Delta l\cos\theta = p_1\left(1 - j\frac{\omega}{c}\Delta l\cos\theta\right) \qquad 6\text{-}13$$

سلطان

بفرض أن U_D ج م م السرعة الحجمية للحجاب، U_o ج م م السرعة الحجمية للهواء المار خلال المقاومة، p_D محصلة ج م م الضغط الذي يعمل على تحريك الحجاب، و Z_{AD} هي معاوقة الحجاب الحاجز، حينئذ، يمكننا كتابة المعادلات التالية من الشكل 6ـ7ب:

$$U_D\left(Z_{AD}+\frac{1}{j\omega C_A}\right)-\frac{U_o}{j\omega C_A}=p_1$$

$$-\frac{U_D}{j\omega C_A}+U_o\left(R_A+\frac{1}{j\omega C_A}\right)=-p_2$$

6-14سلطان

يكون فرق الضغط عبر الحجاب الحاجز على الصورة،

$$p_D=U_D Z_{AD}=\frac{Z_{AD}\left(p_1 R_A+\dfrac{p_1-p_2}{j\omega C_A}\right)}{Z_{AD}R_A-j\left[(R_A+Z_{AD})/\omega C_A\right]}$$

6-15

بالتعويض بالمعادلة 6ـ13 في المعادلة 6ـ15 نحصل على،

$$p_D=p_1\frac{Z_{AD}\left(R_A+\dfrac{\Delta l\cos\theta}{cC_A}\right)}{Z_{AD}R_A-j\left[(R_A+Z_{AD})/\omega C_A\right]}$$

6-16

بفرض

$$\frac{\Delta l}{cC_A R_A}\equiv B$$

6-17سلطان

حيث B مقدار ثابت اختياري بدون أبعاد. بما أن $f_D=p_oS$ ، حيث S المساحة الفعالة للحجاب، يكون لدينا،

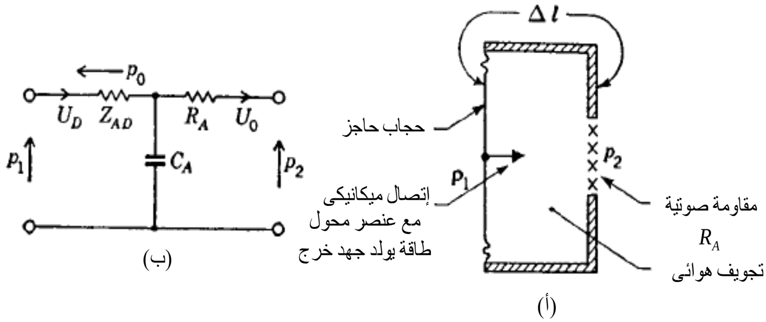
$$|f_D|=p_1|\alpha|S(1+B\cos\theta)$$

6-18سلطان

حيث α النسبة،

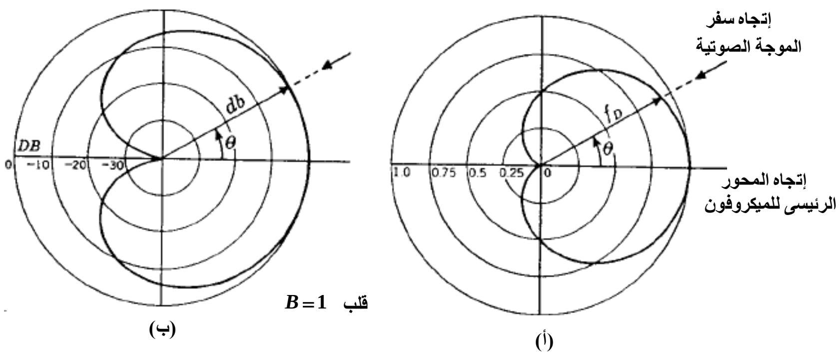
$$\alpha=\frac{Z_{AD}R_A}{Z_{AD}R_A-j[(R_A+Z_{AD})/\omega C_A]}$$

6-19



الشكل 7ـ6 (أ) مخطط لمجموعة ميكروفون ضغطي ومنحدر ضغطي يتكون من وعاء قائم أحد جوانبه حجاب حاجز قابل للحركة والجانب الأخر عبارة عن فتحة لها مقاومة صوتية R_A. (ب) دائرة معاوقة – صوتية للشكل (أ).

يبين الشكل 8ـ6أ رسم للقوة $|f_D|$ التي تؤثر على الحجاب كدالة في θ في حالة $B=1$. تم رسم نفس النموذج بوحدات الديسيبل في الشكل 8ـ6ب. يسمى نموذج التوجيهية في حالة $B=1$ بالنموذج القلبي. يبين الشكل 46ـ6 نماذج توجيهية أخرى عند $B = 0,\ 0.5,\ 1,5,\ \text{and}\ \ \infty$.



الشكل 8ـ6 السمات المميزة لمجموعة ميكروفون الضغط والمنحدر الضغطي المبين في الشكل 7ـ6.

الجزء الخامس عشر – ميكروفونات الضغط

إن الميكروفونات الضغطية هي الأكثر استخدام بين الأنواع الأساسية الثلاثة التي تمت مناقشتها في الجزء السابق. هذه الميكروفونات تكون ملائمة في أنظمة القياس الصوتي والتقاط الموسيقى، والكلام في إستديوهات المحطات الإذاعية، وتجهيزات الخطاب – العلني، وفي الوسائل السمعية. يعتقد الكثير من المهندسين والفنانين أن الموسيقى المتولدة من خرج ميكروفون ضغطي جيد ـ التصميم تتفوق على تلك الناتجة عن أنواع الميكروفونات الأكثر توجيها لأن جودة

الانعكاس في الصالة الموسيقية أو الإستديو تبقى بالكامل، لأن تشوه الشكل الموجي غير المرغوب فيه يكون أقل ما يمكن، هذا بالإضافة إلى أن جودة الصوت المعاد توليده لا تعتمد بقوة، كما في الأنواع الأخرى، على مدى قرب المتحدث أو الآلة الموسيقية من الميكروفون.

ثلاثة أنواع رئيسية من ميكروفونات الضغط توجد بشكل شائع في عمل المحطات الإذاعية وعمل الخطاب العلني، وأدوات المساعدة على السمع. تكون هذه الميكروفونات من الأنواع الكهرومغناطيسية، الكهروستاتيكية، والأنواع الكهروضغطية. سوف نحلل واحد من الميكروفونات الشائعة تجاريا من كل نوع من الأنواع الثلاثة في الفصول القليلة المقبلة من هذا الجزء. تستخدم الأنواع المختلفة الأخرى في تطبيقات أخرى، مثل الميكروفون الكربونى في أنظمة التليفونات، ميكروفون السلك الساخن في قياسات الديناميكا الهوائية، وقرص رايليى المستخدم في قياسات سرعة –الجسيم المطلقة. قلة المساحة تمنع إدراجهم ومعالجتهم هنا.

4.6 ميكروفون الملف- المتحرك الكهرومغناطيسي (الميكروفون الديناميكي).

السمات العامة

ميكروفون الملف-المتحرك الكهرومغناطيسي هو آلة عالية الحساسية متوسطة التكاليف. يستخدم هذا الميكروفون بشكل أساسي في العمل الإذاعي والتطبيقات التي تحتاج إلى كابلات طويلة أو حيث يوجد تأرجحات سريعة وكبيرة في درجة الحرارة والرطوبة المتوقعة. لميكرفون الملف المتحرك المصمم بشكل جيد جهد دائرة مفتوحة يستجيب للأصوات الساقطة عشوائيا التي تكون خلال 5 ديسيبل لفي متوسطة على مدى تردد بين 40 و8000 هيرتز. يمكن قياس الضغوط المنخفضة حتى 20 ديسيبل والعالية حتى 140 ديسيبل مع ضغط مرجعة 0.0002 ميكروبار. يعتقد أن تكون التغيرات في الفي مع درجة الحرارة، الضغط، والرطوبة في الآلات الجيدة في حدود تتراوح من 3 إلى 5 ديسيبل كحد أقصى تحت 1000 هيرتز في مدى درجة الحرارة 10 إلى 100 درجة فهرينهيت، ومدى ضغط من 0.65 إلى 0.78 ملى زئبق، ومدى رطوبة من 0 إلى 90 في المائة رطوبة نسبية. تكون معاوقة الميكروفون هي معاوقة الملف-المتحرك. أسفل 1000 هيرتز، فإن المركبة المقاوميه تكون سائدة على المركبة المفاعلة. لمعظم ميكروفونات الملف – المتحرك معاوقة كهربية أسمية في حدود 20 أوم. لا تكون المعاوقة الميكانيكية

كبيرة بدرجة كافية لتسمح بالاستخدام في تجويف مغلق بدون تغيرات خطيرة في ضغط الصوت خلاله. لتوصيل الميكروفون الديناميكي إلى شبكة صمام مفرغ يتطلب الأمر إلى محول بنسبة لفات 30:1 (30 إلى 1).

التركيب Construction

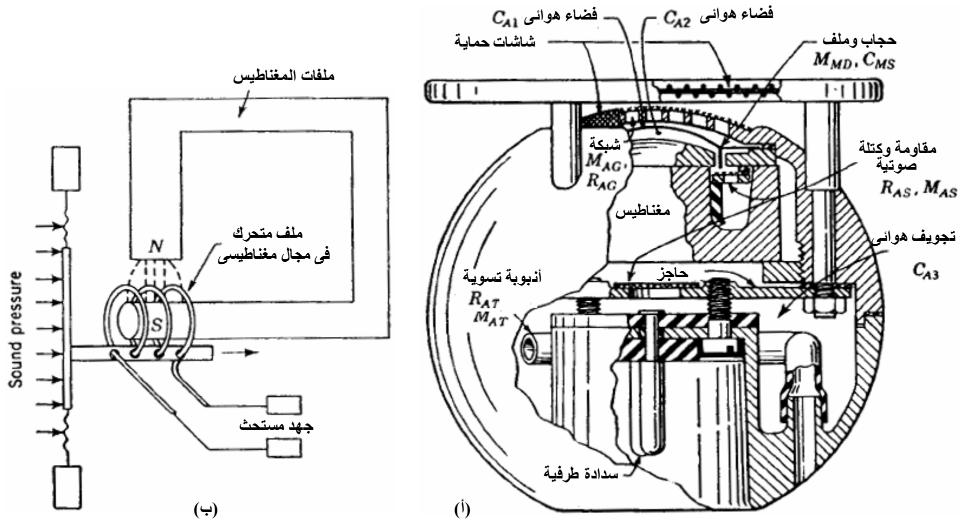
يتركب ميكروفون الملف المتحرك الكهرومغناطيسي من حجاب حاجز مثبت مع ملف سلكي موضوع في مجال مغناطيسي (انظر الشكل 6-9أ). علاوة على ذلك، توجد دوائر صوتية أمام وخلف الحجاب الحاجز لتوسيع في الميكروفون أكثر على مدى التردد. يبين الشكل 6-9ب مخطط مقطع عرضي لنوع ميكروفون الملف – المتحرك الأوسع انتشار.

العلاقات الكهرو – ميكانو – صوتية Electro-Mechano-Acoustaical Relations.

يمر الصوت عبر شاشات الحماية وتصل إلى الشبكة في مقدمة الحجاب. في هذه الشبكة عدد محفور من الثقوب والتي تشكل كتل ومقاومات صوتية صغيرة. تكون هذه الشبكة صغيرة جدا بحيث تعمل معاوقتها للإشعاع كسماعة صوتية وتكون مفاعلية بالدرجة الأولى على كامل مدى التردد (أنظر الشكل 5-3). يكون الفضاء بين الشبكة والحجاب عبارة عن مطاوعة صوتية صغيرة. بالتالي، فإن الدائرة الصوتية الكلية عند مقدمة الحجاب تكون كما هي مبينة في الشكل 6-10. الضغط p_{B1} هو ذلك الضغط الذي تولده الموجة الصوتية عند مقدمة الشبكة عندما تكون فتحات الشبكة مغلقة. U_G هي السرعة الحجمية للهواء الذي يتحرك خلال الشبكة. U_D هي السرعة الحجمية للحجاب الحاجز وتساوى السرعة الخطية الفعالة للحجاب u_D مضروبة في المساحة الفعالة S_D. إن كتلة الإشعاع التي تبدو خارجة من فتحات الشبكة تكون M_{A1}. الكتلة والمقاومة الصوتية لفتحات الشبكة تكونا M_{AG} و R_{AG} على الترتيب. مطاوعة فضاء الهواء عند مقدمة الحجاب تكون C_{A1}. عند كل الترددات، ما عدا العالية جدا، يمكن إهمال تأثير شاشة الحماية.

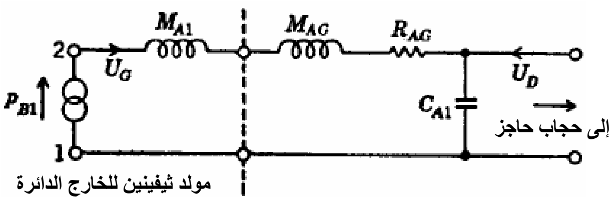
تكون الدائرة الصوتية خلف الحجاب الحاجز أكثر تعقيدا. أولا يوجد فضاء هوائي بين الحجاب والمغناطيس الذي يكون المطاوعة الصوتية (أنظر الشكل 6-9ب). فضاء الهواء هذا يتصل مع

فجوة الهواء الكبيرة التي تكون عبارة عن مطاوعة صوتية أيضا. في ممرات التوصيل توجد شبكات تعمل كمقاومات صوتية. أيضا، تكون ممرات التوصيل كتلة صوتية. تتصل فجوة الهواء الكبيرة مع خارج الميكروفون من خلال أنبوبة تعادل.

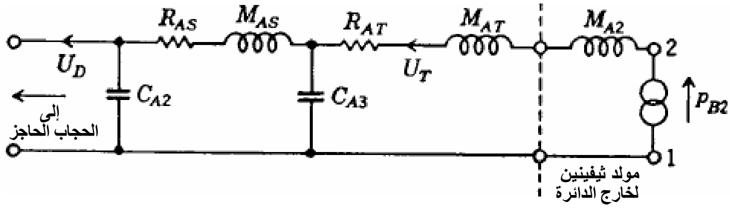


الشكل 9.6 (أ) تمثيل تخطيطي للعناصر الرئيسية لميكروفون الملف – المتحرك (الديناميكي).[1]
(ب) مخطط مقطع عرضي لميكروفون الملف – المتحرك المتوفر تجاريا. [2]

يبين الشكل 11.6 الدائرة الصوتية الكاملة لخلف الحجاب الحاجز. تكون المطاوعة الصوتية الموجودة خلف الحجاب مباشرة هي C_{A2}. تكون المقاومات الصوتية للشاشات هي R_{AS}، بينما تكون الكتلة الصوتية لممر التوصيل هو M_{AS}. تكون المطاوعة الصوتية لفضاء الهواء الكبير هي C_{A3}. تكون الكتلة الصوتية للأنبوبة هي M_{AT}، بينما تكون مقاومتها R_{AT}. كتلة الإشعاع، كما تبدو من الأنبوبة، تكون M_{A2}. الضغط p_{B2} هو ضغط الصوت الذي سوف يتولد عند النهاية الخارجية للأنبوبة عند سدها بحيث لا يتحرك هواء خلالها، بمعنى أن $U_r = 0$.



الشكل 10.6 الدائرة الصوتية للعناصر الموجودة في مقدمة الحجاب الحاجز للميكروفون المبين في الشكل 9.6 (دائرة تناظر معاوقة- صوتية).

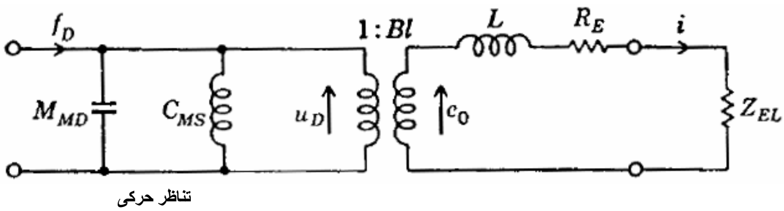


الشكل 11.6 الدائرة الصوتية للعناصر الموجودة خلف الحجاب الحاجز للميكروفون المبين في الشكل 9.6 (دائرة تناظر معاوقة- صوتية).

عند الترددات المنخفضة، حيث يكون الفاصل بين النهاية الخارجية لأنبوبة التعادل والشبكة صغيرا مقارنة مع الطول الموجي، فإن $p_{B1} = p_{B2}$. عند الترددات العالية، حيث يكون متوقعا أن يختلف p_{B1} عن p_{B2} ، فإن ωM_{AT} يصبح كبيرا جدا و $1/\omega C_{A3}$ يصبح صغيرا جدا بحيث تكون حركة الحجاب الحاجز U_D مستقلة عن p_{B2} . بالتالي، يمكننا رسم دائرتنا كما لو أن $p_{B1} = p_{B2}$ على كامل مدى التردد مع خطأ صغير يمكن إهماله. سوف يتم عمل ذلك في الشكل 14.6.

يبين الشكل 12.6 الدائرة الكهروميكانيكية (تناظر ميكانيكي-حركية) للحجاب الحاجز وملف الصوت. تكون القوة التي تؤثر على الحجاب هي f_D ، وسرعتها الناتجة هي u_D . هنا، M_{MD} هي كتلة الحجاب وملف الصوت. C_{MS} هي مطاوعة التعليق، L هي محاثة الملف الصوتي، و R_E هي المقاومة الكهربية لملف الصوت.

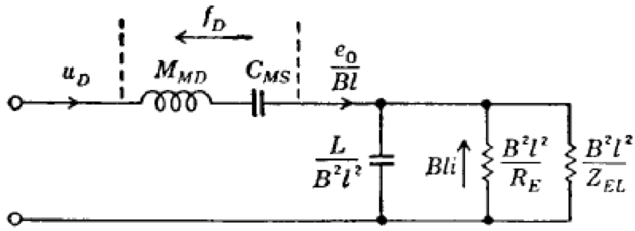
Z_{EL} المعاوقة الكهربية للحمل الكهربي الذي يتم توصيل الميكروفون عليه. الكمية $e_o = Blu_D$ هو جهد الدائرة – المفتوحة المتولد بواسطة الميكروفون.



الشكل 12.6 الدائرة الكهروميكانيكية للحجاب الحاجز وملف الصوت، والمجال المغناطيسي للميكروفون المبين في الشكل 9.6 (تناظر ميكانيكي-حركي).

لكي نجمع بين الأشكال 10.6، 11.6، و12.6 يجب أخذ زوج الشكل 12.6أولا، وهو مبين في

الشكل 6ـ13. الأن، لكى نضم الأشكال 6ـ10، 6ـ11، و6ـ13، يجب قسمة القوى الموجودة في الشكل 6ـ13 على مساحة الحجاب الحاجز S_D ، وضرب كل السرعات في S_D . يمكن عمل هذا بإدخال محول مساحة إلى الدائرة. بفرض أن $p_{B1} = p_{B2} \equiv p_B$ ، وأن U_D يجب أن تكون هي نفسها لكل الدوائر الثلاثة، فإننا نحصل على الدائرة المبينة في الشكل 6ـ14 لميكروفون الملف – المتحرك.



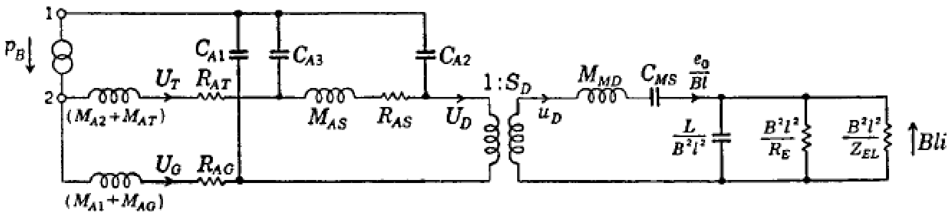
الشكل 6ـ13 الدائرة الكهروميكانيكية للحجاب الحاجز وملف الصوت، والمجال المغناطيسي للميكروفون المبين في الشكل 6ـ9 (تناظر ميكانيكى معاوقي). لاحظ أن u_D تساوى أيضا e_o / Bl .

<u>الأداء Performance</u>

يكون الفهم الأفضل لأداء الدائرة المبينة في الشكل 6ـ14 بالرجوع للشكل 6ـ15، والذي تم اشتقاقه من الشكل 6ـ14. دعنا نفترض من الأن فصاعدا أن $Z_{EL} \to \infty$. هذا يعنى أن الأطراف الكهربية تكون دائرة – مفتوحة بالتالي يكون الجهد الذي يظهر عبرها هو جهد الدائرة – المفتوحة e_o (أنظر الشكل 6ـ12). في الدائرة المينة في الشكل 6ـ14، سرعة " دائرة –القصر" تساوى e_o / Bl .

عند الترددات المنخفضة جدا يختزل الشكل 6ـ14 إلى الشكل 6ـ15أ. يكون المولد p_B بشكل فعال عبارة عن دائرة – مفتوحة بواسطة المطاوعات الصوتية الثلاثة C_{A1} ، C_{A2} ، و C_{A3} والتي تكون C_{A3} فقط لها حجم كبير. أيضا، تكون المقاومات الثلاثة R_{AT} ، R_{AG} ، و R_{AS} صغيرة مقارنة مع المفاعلات C_{A3} ، و $C_{MS}S_D{}^2$. من الناحية الفيزيائية، حقيقة أن سرعة الحجاب u_D تكون صغيرة جدا تعنى أن الضغط على جانبي الحجاب يكون متساوي، وهذا يبدو أنه حقيقي في حالة التغيرات البطيئة في الضغط الجوي. بالتالي يكون الجهد e_o صغير جدا. تم الإشارة إلى

هذا المدى بالرمز (a) في الشكل 6ـ16، حيث نرى في الجهد بالديسيبل كدالة في التردد. في المنطقة (a) تزداد الفي بمعدل 12 ديسيبل لكل أوكتاف بزيادة التردد. (الأوكتاف هو تغير التردد بالمضاعفة أو التنصيف. على سبيل المثال عند تغير التردد على النحو 10، 20، 40، 80،.. هيرتز مثلا أو على النحو 10، 5، 2.5، .. مثلا، يقال أن التردد يغير واحد أوكتاف كل مرة. أما عند تغير التردد على النحو 10، 100، 1000، .... هيرتز أو على النحو 10، 1،0.1، 0.01، .. يقال أن التردد يغير واحد ديكيد في كل مرة. المترجمون)



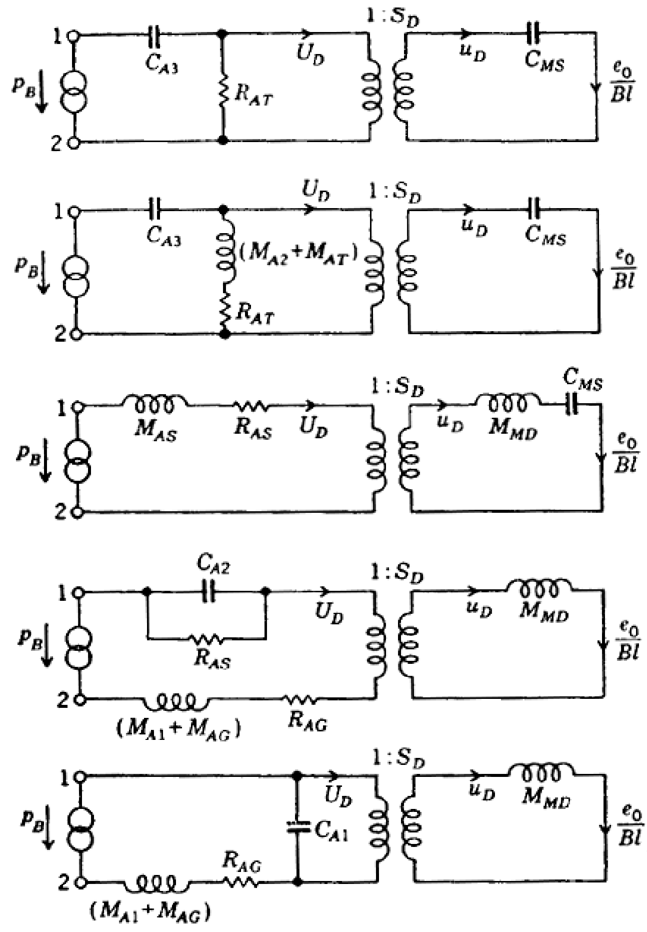
الشكل 6ـ14 الدائرة الكاملة الكهروميكانيكوصوتية لميكروفون الملف – المتحرك المبين في الشكل 6ـ9 (تناظرمعاوقي). تم إزالة المحول الكهروميكانيكى من الدائرة.

عند التردد العالي (انظر الشكل 6ـ15ب) تكون حالة الرنين تضمين تجويف كبير خلف الحجاب مع مطاوعة C_{A3} و أنبوبة تعادل مع كتلة ومقاومة M_{AT} و R_{AT}. هنا، تزيد القوى عند مؤخرة الحجاب الحاجز عن تلك الموجودة عند الجبهة. تم الإشارة إلى هذه المنطقة بالرمز (b) في الشكل 6ـ16.

عند زيادة التردد (أنظر الشكل 6ـ15ج)، تحدث حالة رنين مضمحل بشدة متضمنة مقاومة وكتلة الشاشات خلف الحجاب، R_{AS}، و M_{AS}. وثوابت الحجاب الحاجز نفسه، M_{MD} و C_{MS}.

هذه هي المنطقة (c) في الشكل 6ـ16. لهذا تكون سمة التصميم البالغة الأهمية هي أن مقاومة الشاشات R_{AS} تكون كبير بشكل كافي يجعل منحنى الفي في المنطقة (c) مسطحا كلما أمكن.

فوق المنطقة (c) (انظر الشكل 6ـ15د)، تتولد حالة رنين تتضمن بشكل أساسي كتلة الحجاب الحاجز M_{AD}، وجسوء (تصلب) الهواء خلفه مباشرة، C_{A2}. هذا يعطى الفي المبينة بالمنطقة (d) في الشكل 6ـ16.

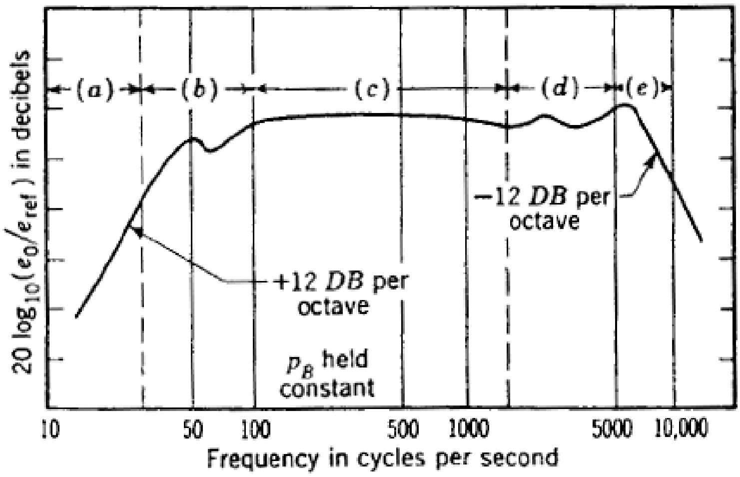


الشكل 15.6 ميكروفون الملف – المتحرك. دوائر مبسطة لخمسة مناطق تردد (تناظر معاوقة). زيادة الضغط (p_B) المتولدة بواسطة الموجة الصوتية عند شبكة الميكروفون مع غلق فجوات الشبكة وجهد الدائرة المفتوحة e_o .

أخيرا، يحدث الرنين الثالث متضمنا بشكل أساسي العناصر الصوتية عند مقدمة الحجاب الحاجز (أنظر الشكل 15.6هـ والمنطقة (e) في الشكل 16.6). حينئذ، تضمحل الفي بمعدل 12- ديسبيل لكل مضاعفة تردد.

تؤدي شروط الرنين المختلفة في الميكروفون الذي تكون استجابته مستوية في مدى الترددات من 50 إلى 8000 هيرتز ماعدا تأثيرات التشتت القريبة من الميكروفون. سوف تؤثر تأثيرات التشتت هذه على الاستجابة بطرق مختلفة، وهذا يعتمد على اتجاه انتقال الموجة الصوتية بالنسبة لمكان الميكروفون. إن التأثير العادي هو أن الفي تتحسن في المناطق (d) و(e) عندما تصطدم الموجة

الصوتية الساقطة بشكل عمودي على شبكة الميكروفون مقارنة مع الموجة التي تسقط مماسة. أحد أغراض شاشة الحماية الخارجية هو تقليل هذا التحسن.



الشكل 16.6 مميزة في جهد – الدائرة – المفتوحة لميكروفون الملف – المتحرك من النوع المبين في الشكل 9.6. في الحالة الطبيعية، يؤخذ الجهد المرجعي e_{ref} في خلاف اللوغاريتم مساويا لواحد فولت.

5.6 الميكروفون الكهروستاتيكي (ميكروفون السعة)

السمات العامة

يستخدم الميكروفون من النوع الكهروستاتيكي بشكل مكثف كميكروفون قياسي لقياس ضغط الصوت وكميكروفون استديو ذو مصداقية (نقاء) عالية في التقاط الموسيقى. يمكن تصنيعه في حجم صغير حتى لا يحدث اضطراب كبير في المجال الصوتي في مدى التردد الأقل من 1000 هيرتز.

يمكن قياس مستويات ضغط – الصوت المنخفضة حتى 35 ديسيبل والمرتفعة حتى 140 ديسيبل بالنسبة لضغط مرجعي 0.0002 ميكروبار بواسطة آلات قياسية. تكون المعاوقة الميكانيكية هي ممانعة الجسوء وتكون عالية جدا بحيث يكون قياس الضغوط الصوتية في التجاويف ممكننا. تكون المعاوقة الكهربية هي معاوقة سعويه نقية.

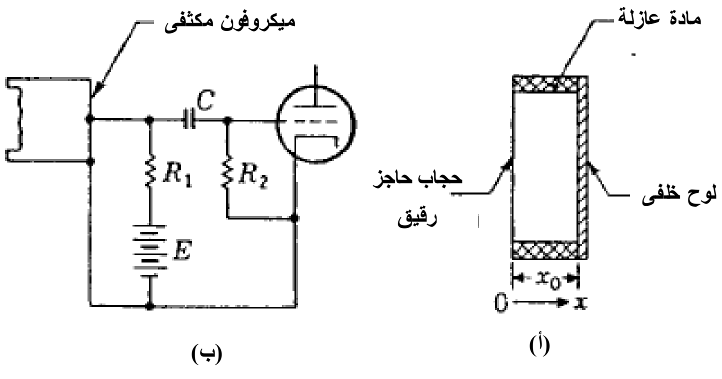
يكون معامل درجة الحرارة لميكروفون السعة الجيد التصميم أقل من 0.025 ديسيبل لكل

درجة فهرنهيت ارتفاع في درجة الحرارة.

إن استمرار التشغيل عند الرطوبة النسبية العالية قد يسبب تشغيل صاخب (ضوضائي) بسبب التسريب (الإرتشاح) عبر العوازل الداخلية. يمكن العودة إلى التشغيل الهادئ (المعتاد) بالتجفيف.

التركيب

من حيث المبدأ، يتركب الميكروفون الكهروستاتيكي من حجاب حاجز رقيق، مسافة صغيرة جدا يوجد خلفها لوح خلفي (أنظر الشكل 6ـ17). يكون الحجاب واللوح الخلفي معزولين كهربيا عن بعضهما البعض وعن المكثف الكهربي. يبين الشكل 6ـ18 شكلين تجاريين لهذا النوع من الميكروفون. الفرق الرئيسى بين تركيب النوع 640-AA والنوع 21-C هو أن النوع الأول له شقوق حلقية مقطوعة فيه. تكون هذه الشقوق مقاومة صوتية تعمل على تخميد الحجاب عند الرنين. يظهر الأسلوب الذي تعمل فيه الميكروفونات في الشكل 6ـ17ب. تكون المقاومة R_1 كبيرة جدا. يكون الجهد المباشر E عدة مئات من الفولت ويعمل على استقطاب الميكروفون.



الشكل 6ـ17 (أ) تمثيل تخطيطى للميكروفون الكهروستاتيكى. (ب) دائرة بسيطة لأنبوبة – مفرغة (صمام ثلاثي) للاستخدام مع ميكروفون السعة.

علاقات كهروميكانيكية

من الناحية الكهربية، الميكروفون السعوي هو عبارة عن مكثف يتغير مع الزمن بحيث تكون الشحنة الكلية على الصورة،

$$Q(t) = q_o + q(t) = C_E(t)[E + e(t)] \qquad 6\text{-}20$$

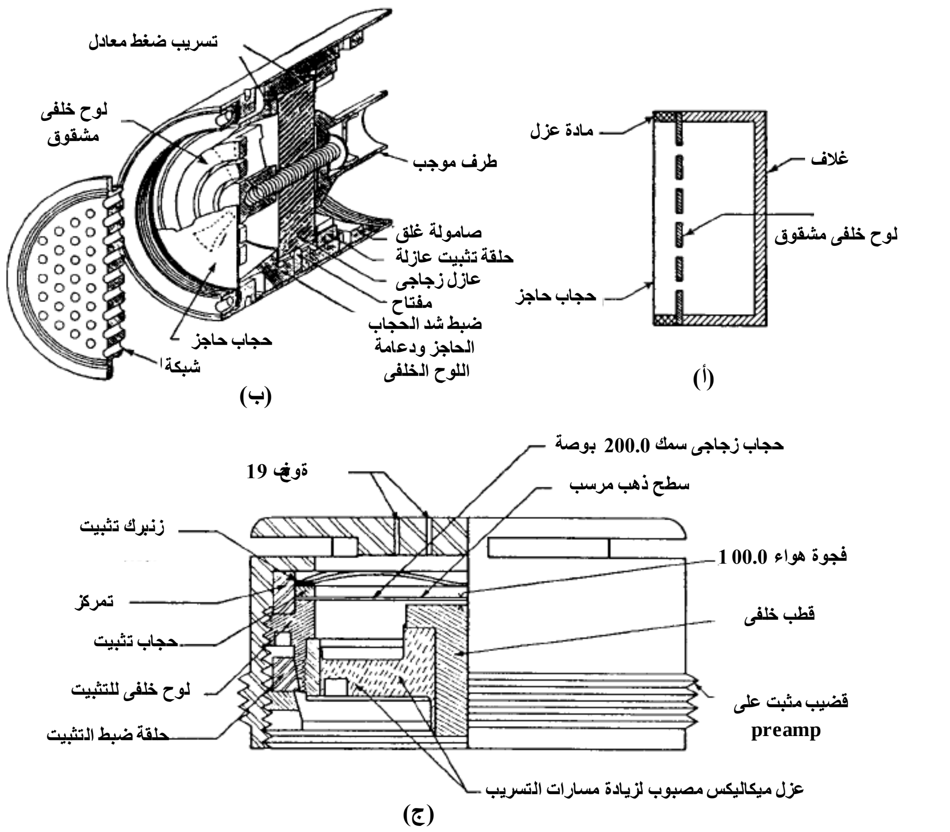
حيث q_o هي الشحنة الخامدة بالكولوم، $q(t)$ هي الشحنة التزايدية بالكولوم، $C_E(t)$ السعة بالفاراد، E جهد الاستقطاب الخامد بالفولت، و $e(t)$ هو الجهد التزايدى بالفولت.

السعة $C_E(t)$ بالفاراد (انظر الشكل 6ـ17أ) تعطى بالعلاقة التالية،

$$C_E(t) = C'_{Eo} + C_{E1}(t) = \frac{\varepsilon_o S}{x_o - x(t)}$$

$$\approx \frac{\varepsilon_o S}{x_o}\left[1 + \frac{x(t)}{x_o}\right] \approx C'_{Eo}\left[1 + \frac{x(t)}{x_o}\right] \qquad 6\text{-}21$$

سلطان



الشكل 6ـ18 (أ) تمثيل تخطيطى لميكروفون بلوح خلفي مشقوق. (ب) رسم مقطع عرضي لميكروفون السعة من نوع W.E. 640-AA. يعمل اللوح الخلفي المشقوف كطرف ثاني للمكثف وكوسيلة لتخميد نمط الرنين الأساسي للحجاب الحاجز. (ج) رسم مقطع عرضي لميكروفون السعة من نوع Altec 21-C. يعمل الغطاء بالثقوب الموجودة فيه للحماية وكشبكة صوتية عند الترددات العالية[3].

حيث C'_{Eo} هي السعة بالفاراد عند $x(t)=0$ و $C_{E1}(t)$ هي السعة التزايدية بالفاراد، ε_o عامل التناسب ويساوى في حالة الهواء 8.85×10^{-12}، S هي المساحة الفعالة للوح واحد بالمتر المربع، x_o المسافة الفاصلة الخامدة بالمتر، و $x(t)$ المسافة الفاصلة التزايدية بالمتر. أفترض عند كتابة الطرف الأيمن للمعادلة 21.6 أن مربع أقصى قيمة للمسافة $x(t)$ يكون صغيرا مقارنة مع $x_o{}^2$.

إذا افترضنا بالمثل أن $[e(t)]^2_{\max} << E^2$، حينئذ من المعادلات 20.6 و21.6 نحصل على،

$$q_o+q(t)=C'_{Eo}\,E+C'_{Eo}\,E\left[\frac{e(t)}{E}+\frac{x(t)}{x_o}\right] \qquad 6\text{-}22$$

بالتالي،

$$q(t)=C'_{Eo}[e(t)+\frac{E}{x_o}x(t)] \qquad 6\text{-}23$$

إن طاقة الوضع الكلية المختزنة عند أي لحظة $W(t)$ تساوى مجموع الطاقات الكهربية والميكانيكية المختزنة، بمعنى أن $\frac{1}{2}\frac{Q(t)^2}{C_E(t)}+\frac{1}{2}\frac{x(t)^2}{C_{MS}}$، حيث C_{MS} هي المطاوعة الميكانيكية للوح المتحرك بالمتر/النيوتن. أى أن،

$$W(t)=\frac{1}{2}\frac{[q_o+q(t)]^2}{C'_{Eo}+C_{E1}(t)}+\frac{1}{2}\frac{x(t)^2}{C_{MS}}\approx\frac{1}{2}\frac{q_o{}^2+2q_oq(t)}{C'_{Eo}\left[1+\dfrac{x(t)}{x_o}\right]} \qquad 6\text{-}24$$

$$+\frac{1}{2}\frac{x(t)^2}{C_{MS}}=\frac{1}{2}\frac{q_o}{C'_{Eo}}[q_o+2q(t)]\left[1-\frac{x(t)}{x_o}\right]+\frac{1}{2}\frac{x(t)^2}{C_{MS}}$$

يمكن الحصول على القوة اللحظية (بالنيوتن) التي تعمل على تحريك اللوح من معادلة الشغل $dW = f\,dx$ على الصورة،

$$f_o+f(t)=\frac{dW(t)}{dx} \qquad 6\text{-}25$$

بالتالي، بتفاضل المعادلة 24.6 نحصل على

$$f_o + f(t) \approx \frac{q_o}{2x_o\, C'_{Eo}}\left[q_o + 2q(t)\right] + \frac{x(t)}{C_{MS}}$$
$$= -\frac{q_o^{\ 2}}{2x_o\, C'_{Eo}} + \left[\frac{x(t)}{C_{MS}} - \frac{q(t)\, q_o}{x_o\, C'_{Eo}}\right]$$ 6-26سلطان

بالتالي، حيث $E = q_o / C'_{Eo}$ نحصل على

$$f(t) = \frac{x(t)}{C_{CM}} - \frac{E\, q(t)}{x_o}$$ 6-27

بإعادة ترتيب المعادلة 6ـ23 نحصل على،

$$e(t) \approx -\frac{E\, x(t)}{x_o} + \frac{q(t)}{C'_{Eo}}$$ 6-28

في الحالة الثابتة،

$$j\,\omega\, q = i$$
$$j\,\omega\, x = u$$ 6-29سلطان

حيث q، i، x، و u تؤخذ الأن كـج م م الكميات المركبة. لذلك، تصبح المعادلات 6ـ27 و6ـ28 على الصور،

$$f = \frac{1}{j\,\omega\, C_{CM}} u - \frac{E}{j\,\omega\, x_o} i$$ 6-30

$$e = -\frac{E}{j\,\omega\, x_o} u + \frac{1}{j\,\omega\, C'_{Eo}} i$$ 6-31

e و f تكون ج م م الكميات المركبة أيضا.

دوائر التناظر

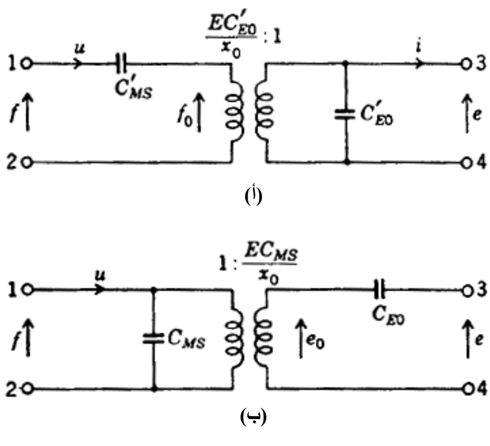
يمكن تمثيل المعادلات 6ـ30 و6ـ31 إما بواسطة الشبكات المبينة بالشكل 6ـ19، حيث،

$$C'_{Eo} = \frac{C_{Eo}C_{MS}(x_o{}^2/E^2C_{MS}{}^2)}{C_{Eo}+C_{MS}(x_o{}^2/E^2C_{MS}{}^2)} = \frac{C_{Eo}\,x_o{}^2}{E^2\,C_{MS}C_{Eo}+x_o{}^2} = \frac{C_{Eo}}{(E^2/x^2)C_{MS}C_{Eo}+1}$$ 6-32سلطان

$$C_{MS} = \frac{C'_{MS}}{(E^2/x^2)C'_{MS}\,C_{Eo}+1}$$ 6-33سلطان

لاحظ بشكل خاص أن C_{MS} هي المطاوعة الميكانيكية المقاسة عند تيار كهربي $i=0$. C_{Eo} السعة الكهربية المقاسة عند القوة f تساوى صفر، C'_{Eo} السعة الكهربية المقاسة عند سرعة u تساوى صفر، و C'_{MS} المطاوعة الميكانيكية المقاسة عند جهد e يساوى صفر. تم بيان هذه الدوائر أولا في الشكل 3ـ37 وأعطيت إحجام العنصر بالمعادلات 3ـ34 و3ـ37. عمليا، تستخدم الدائرة المبينة في الشكل 6ـ19ب بشكل طبيعي للميكروفونات الكهروستاتيكية.

عندما يبث أحد الميكروفونات المبينة في الشكل 6ـ18 صوت إلى الهواء، فإن القوة المبنية على وجه الميكروفون عند تطبيق جهد على أطرافه الكهربية (3ـ4 في الشكل 6ـ19) تكون صغيرة جدا. بالتالي، عند استخدام قنطرة معاوقة – كهربية لقياس سعة الميكروفون، فإن السعة التي يتم الحصول عليها تساوى C_{Eo} تقريبا.

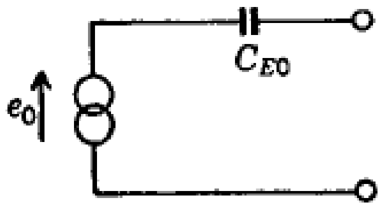


الشكل 6ـ19 دوائر تناظرية كهروميكانيكية بديلة للميكروفون الكهروستاتيكي (تناظر – معاوقة).

بواسطة نظرية ثيفينين، يمكن تمثيل ميكروفون السعة في المجال الحر بالشكل 6ـ20.
الكمية e_o هي ج م م جهد الدائرة – المفتوحة المتولد عند أطراف الميكروفون بواسطة الموجة الصوتية ويساوي (من المعادلة 6ـ31 والشكل 6ـ19)،

$$e_o = -\frac{u\,E}{j\omega\, x_o} = -\frac{C_{MS}\, S\, p_B\, E}{x_o} \qquad \text{6-34}$$

حيث f_B هي القوة المؤثرة على الميكروفون الذي له حجاب معاق بحيث $u = 0$، وهذه القوة تساوي الضغط المعاق p_B مضروب في مساحة الحجاب S.

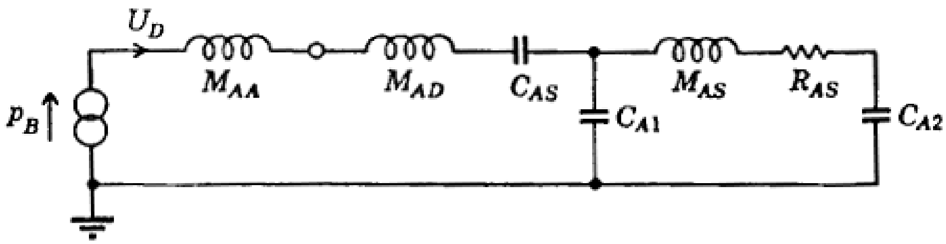


الشكل 6ـ20 دائرة ثيفينين لميكروفون سعوي من النوع المبين في الشكل 6ـ17 موضوع في الفضاء الحر.

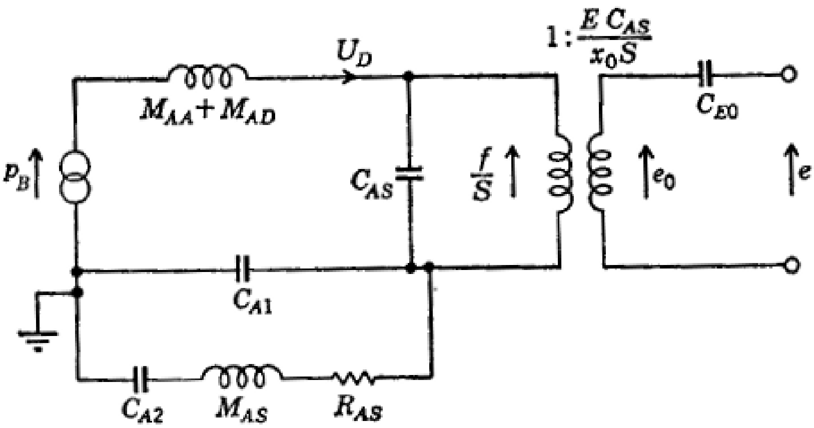
علاقات صوتية

للميكروفونات المبينة في الشكل 6ـ18 حجاب حاجز له خاصية الكتلة M_{MD} بالإضافة إلى المطاوعة الميكانيكية C_{MS} المفترضة حتى الأن. في حالة الميكروفون 640-AA، فإن الدائرة الصوتية تتكون من فضاء هوائي خلف الحجاب مباشرة له مطاوعة صوتية C_{A1}، لوح خلفي وشقوق لها مقاومة كتلة صوتية R_{AS} و M_{AS}، وتجويف هوائي حول وخلف اللوح له جسوء صوتي C_{A2}. تكون معاوقة الإشعاع كما ترى خارجة من جانب المقدمة للحجاب هي $j\omega M_{AA}$، حيث M_{AA} توجد من المعادلة 5ـ31. يبين الشكل 6ـ21 الدائرة الصوتية والميكانيكية الكاملة في تناظر نوع – المعاوقة. في هذه الدائرة، p_B تساوي ج م م الضغط عند الحجاب عندما يمنع من الحركة، $M_{AD} = M_{MD} / S^2$ هي الكتلة الصوتية للحجاب، S هي المساحة الفعالة للحجاب، و $U_D = S\, u_D$ هي ج م م السرعة الحجمية للحجاب. كل الوحدات تكون في نظام م كجم ث.

عند ضم الشكل 6ـ19 مع الشكل 6ـ21 نحصل على الدائرة الكاملة للميكروفون الكهروستاتيكى المبينة في الشكل 6ـ22.



الشكل 6ـ21 الدائرة الصوتية لميكروفون سعوي يتضمن كتلة إشعاع وعناصر صوتية خلف الحجاب (تناظر – معاوقة).



الشكل 6ـ22 الدائرة الكهروصوتية الكاملة لميكروفون سعوى (تناظر – معاوقة).

الأداء

يظهر أداء الميكروفون السعوي في الشكل 6ـ18ب، بواسطة، ميكروفون من النوع 640-AA، ويمكن فهم الأداء بشكل أفضل بالإشارة إلى الأشكال 6ـ23 و6ـ24، والتي تم اشتقاقها من الشكل 6ـ22. عند الترددات المنخفضة تكون الدائرة أساسا الدائرة المبينة في الشكل 6ـ23أ. من هذه الدائرة، يعطى جهد الدائرة – المفتوحة e_o بالعلاقة،

$$e_o = p_B \frac{E}{x_o S} \frac{C_{A2} C_{AS}}{C_{A2} + C_{AS}} \qquad 6\text{-}35$$

لهذا، عند الترددات المنخفضة نجد أن e_o لا يعتمد على التردد. تم الإشارة إلى دائرة منطقة التردد هذه في الشكل 6ـ24 بالشكل (أ).

على مقربة من الرنين الرئيسي الأول، تصبح الدائرة كما هي مبينة بالشكل 6ـ23ب. عند الرنين، تتحد السرعة الحجمية خلال المطاوعة C_{AS} فقط بواسطة مقدار المقاومة الصوتية R_{AS}. بشكل عام، يتم اختيار هذه المقاومة لتكون كبيرة بالشكل الذي يحدث الرنين فقط عند 2 ديسيبل تقريبا (26٪) أعلى من الفي عند الترددات المنخفضة. يبين الشكل 6ـ24 الجزء (ب) الفي بالقرب من الرنين.

فوق تردد الرنين، تصبح الدائرة على الشكل 6ـ23ج. تحكم السرعة الحجمية بالكامل بواسطة مفاعلة الكتلة. بالتالي،

$$e_o = \frac{p_B E}{\omega^2 (M_{AA} + M_{AD} + M_{AS}) x_o S} \qquad 6\text{-}36$$

في منطقة التردد هذه تتناقص الفي بمعدل 12 ديسيبل لكل أوكتاف (أنظر المنطقة (ج) في الشكل 6ـ24).

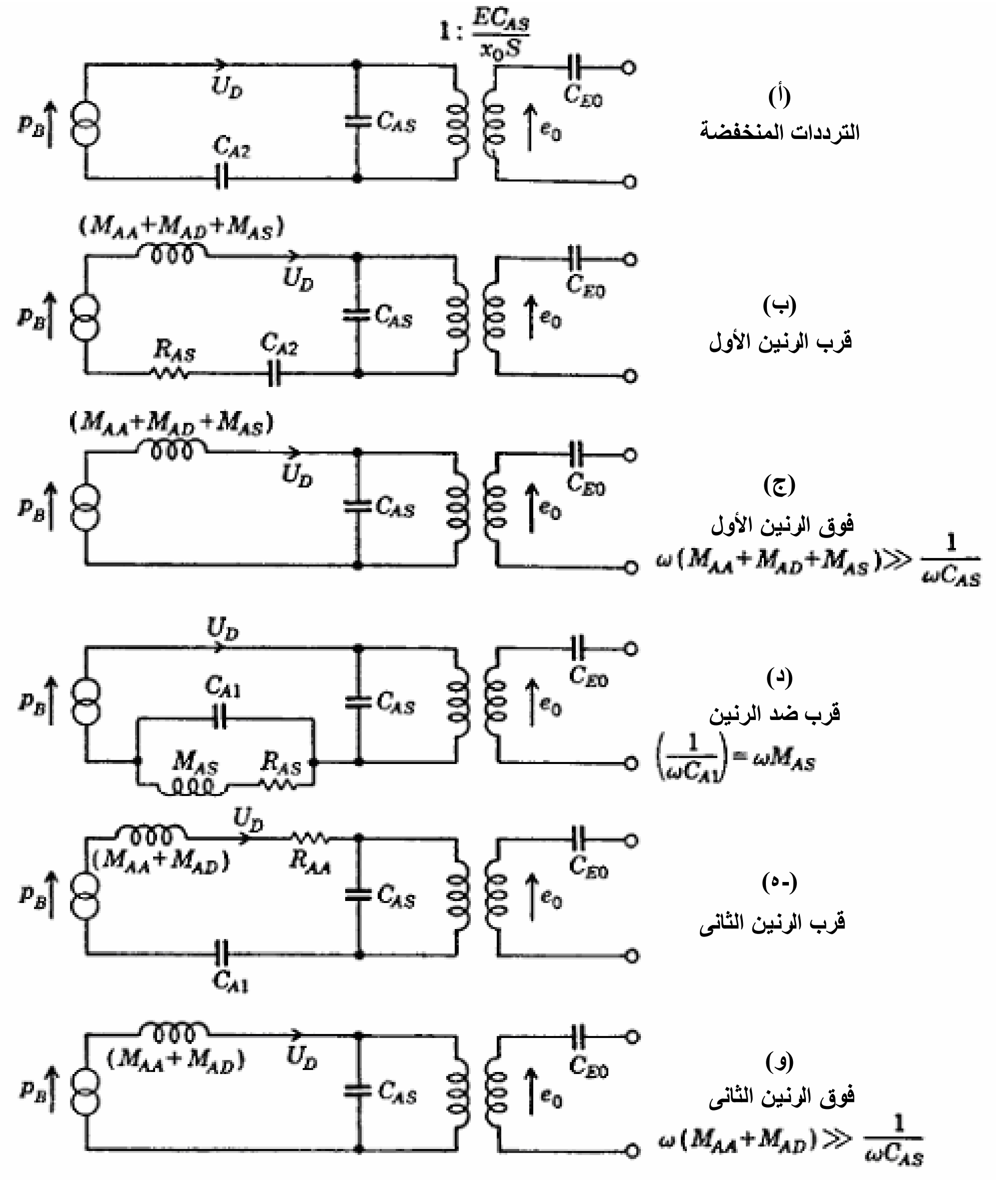
عند التردد العالي، تعمل دائرة التوازي في عكس الرنين، وتهبط الفي منخفضة جدا. يمكن رؤية هذه الحالة بالرجوع للشكل 6ـ23 د. قبل نقطة ضد الرنين مباشرة، يحدث الرنين كما هو مبين بالشكل (هـ). تتحدد قيمة ذروة الرنين هنا بمقاومة الإشعاع R_{AA} ، التي لم تعد مهملة بالمقارنة مع $j\omega M_{AA}$ (أنظر (e) الشكل 6ـ24). أخيرا، قبل تردد الرنين هذا، يهبط جهد الدائرة – المفتوحة مرة أخرى بمعدل 12 ديسيبل لكل أوكتاف (أنظر (f) في الشكل 6ـ24).

6ـ6 الميكروفونات الكهروضغطية.

تستخدم الميكروفونات الكهروضغطية بلورات أو مواد عازلة التي عند التأثير عليها بقوى مناسبة فإنها تولد جهود كهربية ترتبط خطيا مع تشوه المادة. تستخدم المواد الكهروضغطية بشكل كبير بسبب انخفاض تكلفتها ومتانتها.

في هذا الباب سوف يتم مناقشة أربعة أنواع من المواد الكهروضغطية هي ملح روشيل، بلورات

فوسفات الأمونيوم ثنائي الهيدروجين (ADP)، وكبريتات الليثيوم، [4] وألواح سيراميك تيتانات الباريوم.

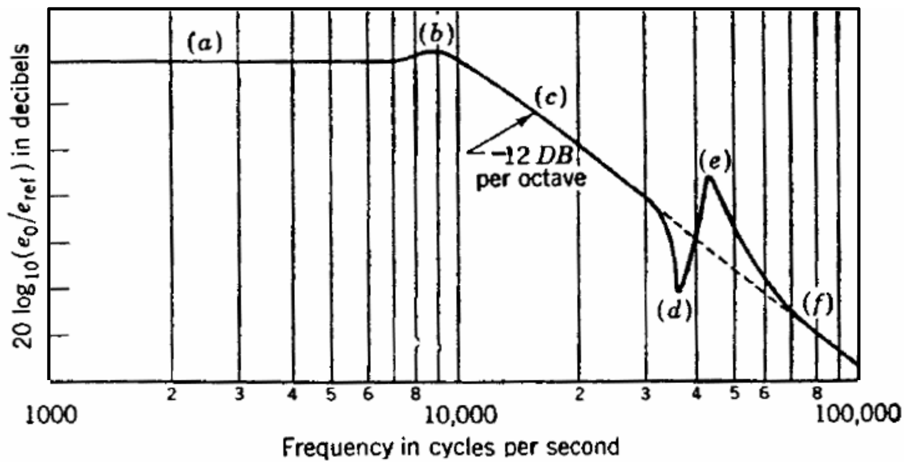


الشكل 23.6 ميكروفون سعوي. دوائر مبسطة لمناطق التردد الستة (تناظر – معاوقة). يكون الضغط الزائد المتولد بالموجة الصوتية عند الحجاب الحاجز للميكروفون مع بقاء الميكروفون بدون حركة p_B ويكون جهد الدائرة – المفتوحة هو e_o.

ميكروفونات البلورة

تستخدم ميكروفونات البلورة بالدرجة الأولى في أنظمة الخطاب –العام، مقاييس مستوى الصوت، وأدوات المساعدة على السمع. لهذه الميكروفونات في ترددية مقبولة في هذه التطبيقات وحساسية عالية كما أنها رخيصة التكلفة. يمكن أن يشتري ميكروفون نوع الحجاب الحاجز المنخفض التكلفة لتغطية مدى التردد من 20 إلى 8000 هيرتز مع أقصى تغير عن القيمة المتوسطة مقداره 6 ديسيبل. بواسطة هذا النوع يمكن قياس مستويات الصوت المنخفضة حتى 20 ديسيبل والمستويات المرتفعة حتى 160 ديسيبل مع ضغط مرجعي 0.0002 ميكروبار.

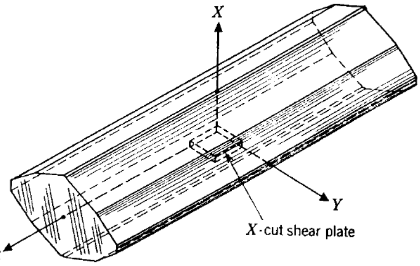
تكون المعاوقة الكهربية هي معاوقة المكثف النقي، والتي في بعض البلورات تتغير مع درجة الحرارة كما سنرى لاحقا. في العادة، لا تكون المعاوقة الميكانيكية باستخدام الحجاب الحاجز كبيرة بالقدر الكافي حتى يمكن استخدام الميكروفون في تجويف مغلق دون تسبب تغير للضغط داخله.



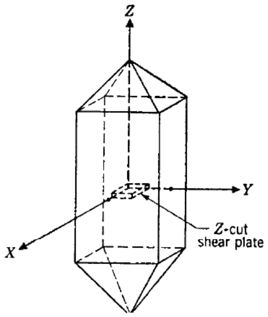
الشكل 6ـ24 مميزة فيجهد الدائرة – المفتوحة للميكروفون السعوى من النوع المبين في الشكل 6ـ18ب. طبيعيا e_{ref} كواحد فولت.

تبين الأشكال 6ـ25 إلى 6ـ27 أشكال نموذجية لبلورات كاملة لملح روشيل، فوسفات الأمونيوم ثنائي الهيدروجين، وكبريتات الليثيوم. يتم الحصول على العناصر المحولة (الناقلة) للطاقة بقطع ألواح (شرائح) من هذه البلورات الكاملة. تكون هذه الألواح في العادة رقيقة ومربعة أو مستطيلة

الشكل. إذا كان المحور X للبلورة عمودي على السطح المستوى للشريحة، يقال أن البلورة مقطوعة – في محور X (أنظر الشكل 6ـ25).



الشكل 6ـ25 شكل نموذجي لبلورة ملح روشيل كبيرة. تم إظهار محاور الإحداثيات وطريقة قطع لوح قص مقطوع في محور X.[5]



الشكل 6ـ26 شكل نموذجي لبلورة فوسفات الأمونيوم ثنائية الهيدروجين (ADP أو PN).[5]

توجد طريقتين أخرتين شائعتين للقطع هما القطع – في محور Y والقطع – في محورZ. يبين الجدول 6ـ1 أن كل مادة متبلورة يمكن أن تستخدم بشكل أفضل فقط إذا تم قطعها بشكل معين.

ألواح القص Shear Plates

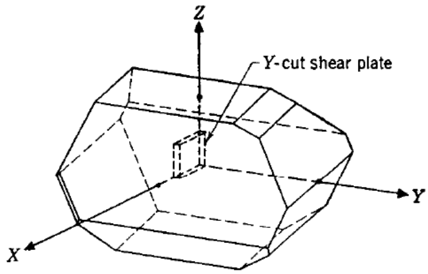
إذا كانت حافتي بلورة ملح روشيل المقطوعة ـ في X موازيتان للمحاور Y وZ، فإنه يتم الحصول على لوح قصى (أنظر الشكل 6ـ28). عند استخدام لوح قصي كمحول طاقة يتم لحام شريحة معدنية على كل جانب من جوانبها كما هو مبين بالشكل 6ـ28أ. تكون الشريحتان المعدنيتان مع البلورة نفسها مكثف كهربى من نوع العازل الصلب. عندما يحث تشوه للبلورة كما هو مبين في الشكل 6ـ28ب، فإن التأثير القصى الناتج في البلورة يسبب ظهور شحنة على المكثف، الأمر الذي يولد فرق جهد بين اللوحين، بقطبية معينة. تشه البلورة في الاتجاه المعاكس، كما بالشكل 6ـ28ج، يعكس القطبية. بالمثل، عند تطبيق فرق جهد على وجهي الشريحة، يتولد إجهاد قصي في مستوى اللوح ويحدث تشوه مثل المبين في الشكل (ب) أو (ج) طبقا للقطبية. بشكل عام تستخدم الميكروفونات قطوعات في محور X أو في محور Y من بلورة ملح

روشيل وقطوعات محور Z في بلورة ADP.

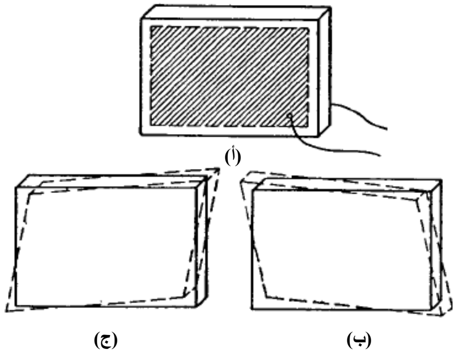
الجدول 1.6 خصائص المواد الكهرضغطية.

Property	Crystals				Ceramic
	Rochelle salt	ADP	LH	Quartz	Barium titanate
Type of strain obtainable	Transverse shear; and expander	Transverse shear; and expander	Transverse and longitudinal shear; and expander and hydrostatic	Transverse and longitudinal shear	Transverse and longitudinal shear; and expander; and hydrostatic
Common cuts	X; 45°X; Y; 45°Y	Z; 45°Z; L	Y	X, Y, AT	
Density, kg/m³	1.77×10^3	1.80×10^3	2.06×10^3	2.65×10^3	5.7×10^3
Low-frequency cutoff at 25°C	0.1 cps	AAA1, 9 cps AAA, 14 cps	Less than 0.2 cps	Less than 0.0001 cps	Less than 0.0001 cps
Volume resistivity		See Fig. 6.37	10^{10} ohm-m	Very high	More than 10^{11} ohm-m
Temperature, for complete destruction	55°C (131°F)	†	†	Loses piezoelectric properties at 576°C	Loses piezoelectric properties at 120°C
Maximum safe temperature	45°C (113°F)	125°C (257°F)	76°C (167°F)	Above 250°C slow decrease of piezoelectric activity	90°C (194°F)
Temperature for appreciable leakage	50°C (122°F)	40°C (104°F)	†		
Maximum safe humidity (unprotected element)	70%	94%	95%	(Not a critical factor except for external short circuits of electrodes)	Moisture absorption 0.1%
Protected with Metalseal	100%				
Humidity above which surface leakage becomes appreciable (unprotected element)	50%	50%	50%	Usually much higher than other piezoelectric materials, except that value depends on surface finish and condition	95%
Minimum safe relative humidity (unprotected element)	40%	0%	0%	0%	0%
Dielectric constant at 30°C	350 (X cut) 9.4 (Y cut)	15.3	10.3	4.5	1700
Maximum breaking stress (alternating compression-tension)	14.7×10^6 newtons/m²	20.13×10^6 newtons/m²	†	76×10^6 newtons/m²	45×10^6 newtons/m²

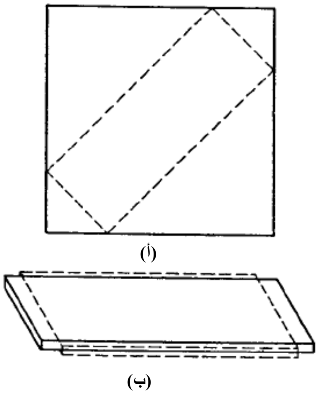
† No data available.



الشكل 6ـ27 شكل نموذجي لبلورة كبريتات ليثيوم (LH) كبيرة.[5]



الشكل 6ـ28 تشوه في لوح قصي يحدث عند تطبيق فرق جهد بين الشريحتين المعدنيتين الملحومتين على أوجه البلورة. (أ) وضع الشرائح المعدنية. (ب) تشوه اللوح القصي عند قطبية معينة. (ج) التشوه عند عكس القطبية.[5]



الشكل 6ـ29(أ) طريقة قطع قضيب متسع بزاوية 45 درجة من لوح قصي. (ب) مخطط يبين تمدد الجوانب وانكماش طول هذا القضيب عند تطبيق فرق جهد على جانبيه.[5]

الألواح المتوسعة Expander Plates

الشكل المهم الأخر لمحول الطاقة البلوري هو اللوح المتوسع بزاوية 45^{o} ، والذي يتم الحصول عليه بقطع اللوح القصي بالأسلوب المبين في الشكل 6ـ29. من الشكل 6ـ28 يتضح أنه عند تطبيق جهد على اللوح القصي فإن أحد إفطاره يزداد طوله والقطر الأخر يقصر. بالتالي، إذا تم عمل بلورة بقطع قطعة من لوح قصي بالأسلوب المبين بالشكل 6ـ29أ فإن الجهود سوف تتولد عند ضغط أو تمديد البلورة على امتداد طولها، كما هو مبين بالشكل 6ـ29ب.

لا تولد معظم البلورات الكهروضغطية ذات الأهمية التجارية، بما فيعا ملح روشيل، وADP، خرج

كبير عند تعريضها لضغط هيدروستاتيكي. هذا يحدث لأن المجموع الجبرى للجهود المتولدة بواسطة التشوهات عبر المحاور الثلاثة في لحظة ما يكون صفر. مع ذلك، توجد في كبيرة لبلورة كبريتات الليثيوم للضغط الهيدروستاتيكي.

توجد نفس العلاقات الكهروميكانيكية للميكروفون البلوري مثل الميكروفون الكهروستاتيكي (أنظر الفصل السابق من هذا الجزء)، أي أن،

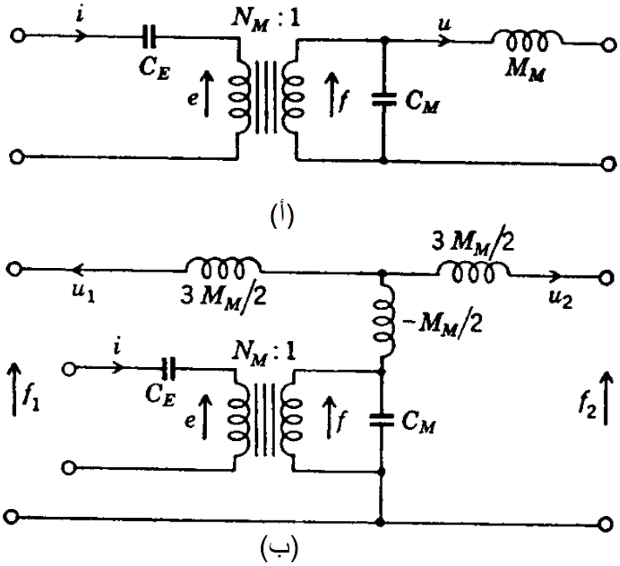
$$
\begin{aligned}
e_o &= -\tau \xi \\
f &= \tau q
\end{aligned}
\qquad 6\text{-}37
$$

حيث e_o جهد الدائرة – المفتوحة (بالفولت) المتولد بواسطة التشوه ξ للبلورة (بالمتر)، f هي القوة التي تعمل على تشوه البلورة المتولدة بالشحنة الكهربية q، و τ معامل الارتباط المعرف بعد المعادلة 3ـ27ب. كما وصفنا في الجزء الثامن يمكن تمثيل مثل هذا الجهاز بالدائرة المكافئة المبينة في الشكل 6ـ30أ، بشرط أن يبقى أحد وجهي البلورة الذي تتولد القوة عبره ثابتا. إذا تم السماح للوجهين بالحركة فإن الدائرة المكافئة يجب أن تعدل كما هو مبين بالشكل 6ـ30ب.

في هذه الدوائر، C_E هي السعة الكهربية (بالفاراد) مقاسة عند ترددات منخفضة والبلورة في الفراغ (وفي حالة كل الأغراض العملية، في الهواء). M_M الكتلة الميكانيكية الفعالة (بالكيلوجرام)، N_M هي نسبة التحويل (المحول) الكهرو-ميكانيكية (بالفولت لكل نيوتن أو بالمتر لكل كولوم)، و C_M هي المطاوعة الميكانيكية (بالمتر لكل نيوتن) مقاسة عند الترددات المنخفضة عندما تكون الأطراف الكهربية دائرة – مفتوحة).

بالنسبة لبلورات ملح روشيل المقطوع – في محور X، تتغير السعة الكهربية كدالة في درجة الحرارة. يبين الشكل 6ـ31 ثابت التناسب هو μ لبلورات غير المثبتة وغير المقيدة. توجد نقطتى انفصال (عدم اتصال) في هذا المنحنى عند $-18\,^oC$ و $+22\,^oC$ وتعرفان بنقط كورى[6]. عند هذه النقاط، تتغير السعة بشكل جذرى مع درجة الحرارة وتتأثر بشكل كبير بالأسلوب الذي بواسطته يتم تثبيت البلورة. على سبيل المثال، لبلورة مثبتة من النوع ثنائي-الشكل[7] (Bimorph) قيمة C_E عند $22\,^oC$، والتي تكون أصغر بثلاث مرات من قيمتها عند

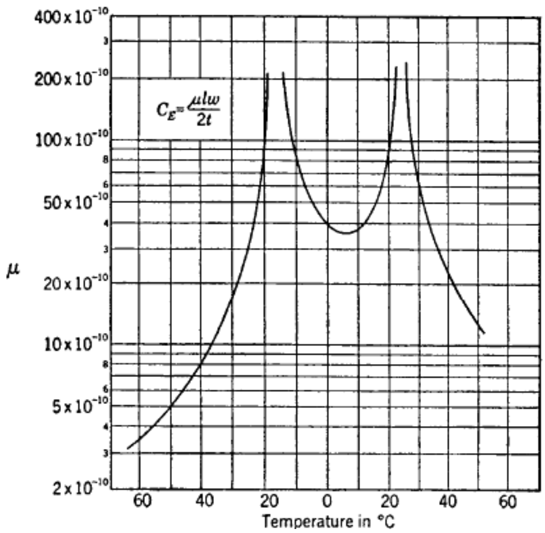
$10\ ^{o}\mathrm{C}$. يوصف هذا السلوك الشاذ عادة بالتغير العنيف لثابت العزل الكهربي الحر. إن الطريقة الواضحة لتجنب التغيرات في الجهد الطرفي المقابلة للتغيرات في السعة هي تشغيل الميكروفون في وضع دائرة مفتوحة.



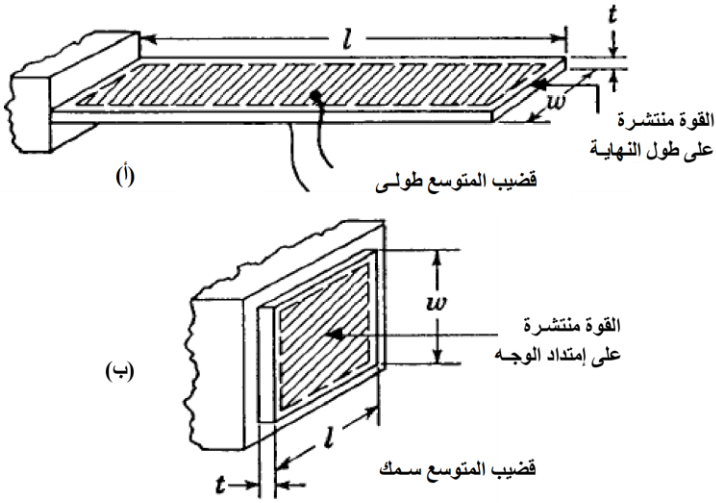
الشكل 6ـ30 الدوائر الكهروميكانيكية المكافئة للميكروفونات الكهروضغطية (تناظر ـ معاوقة). (أ) الدائرة عند إعاقة أحد أوجه العنصر الكهروضغطي، بمعنى لحامه مع السطح الصلب. (ب) الدائرة عندما يكون كلا الوجهين حران ويتحركان.

لا تتغير نسبة التحويل الكهروميكانيكية N_M لهذا النوع من البلورات مع درجة الحرارة. بالنسبة للبلورة غير المثبتة غير المكسوة يقدر التغير بحوالي 0.05 ديسيبل لكل درجة فهرنهيت. في حالة البلورة المقيدة المكسوة في الميكروفون قد يكون هذا التغير صغيرا ويصل إلى 0.02 ديسيبل لكل درجة فهرنهيت. مرة أخرى، هذا يبقى عمل البلورة في نمط الدائرة – المفتوحة.

تكون حجوم العنصر (الشكل 6ـ30) لقضيب متوسع طولي مقطوع – في محور X لملح روشيل $N_M = 0.093/w$ ، $C_M = 31.4\times10^{-12} l/wt$ ، $M_M = 715lwt$ ، و $C_E = \mu lw/2t$. تكون أبعاد l ، w ، و t بالمتر كما هي مبينة في الشكل 6ـ32أ، و μ تعطى في الشكل 6ـ31.



الشكل 31.6 معامل التناسب μ في تعبير السعة الكهربية $C_e = \mu l\, w / 2t$ لقضيب متوسع من ملح روشيل مقطوع –في محور X غير مثبت كدالة في درجة الحرارة. تعرف نقط عدم الاتصال عند $-18\,^oC$ و $+22\,^oC$ بنقط كورى[5].



الشكل 32.6 الأبعاد، طريقة التثبيت، ونقط تطبيق القوة على (أ) قضيب متوسع طول، (ب) قضيب متوسع سمك.

تكون حجوم العنصر لقضيب متوسع طولي مقطوع – في محور Z لفوسفات الأمونيوم الثنائي الهيدروجين $N_M = 0.185 / w$ ، $C_M = 47.4 \times 10^{-12} l / wt$ ، $M_M = 737 lwt$ ، و $C_E = 128 \times 10^{-12} lw/t$. تكون أبعاد l ، w ، و t بالمتر كما هي مبينة في الشكل 32.6أ.

تكون حجوم العنصر لقضيب متوسع السمك من بلورة LH مقطوع – في محور Y (يكون المجال الكهربي موازى للتشوه الميكانيكى للبلورة، أنظر الشكل 6ـ32ب) $N_M = 0.175t/lw$، $C_M = 16.3\times10^{-12}t/lw$، $M_M = 832lwt$، و $C_E = 91\times10^{-12}lw/t$. تكون أبعاد l، w، و t بالمتر.

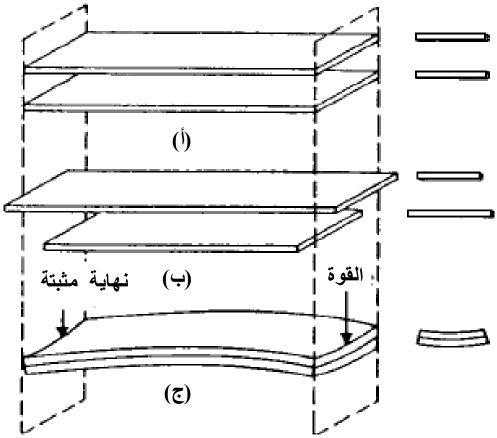
تكون حجوم العنصر (بوحدات معاوقة صوتية في م كجم ث) لقطاع LH يعمل في النمط الهيدروستاتيكي هي، $N_A = 0.148t$، $C_A = 32\times10^{-12}lwt$، و $C_E = 91\times10^{-12}lw/t$. لقيمة M_A أهمية صغيرة بسبب عمليات الرنين المختلفة التي يمكن أن تثار. تكون أبعاد l، w، و t بالمتر كما هي مبينة بالشكل 6ـ32ب ماعدا أن البلورة تكون حرة (بدون دعامة).

ثنائيات – الشكل Bimorph

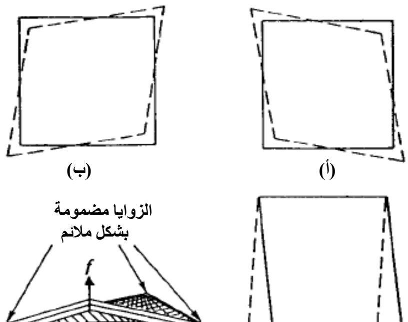
العيب المهم لنوع تركيب القضيب – المتوسع في بعض التطبيقات هو كبر معاوقته الميكانيكية. في حالة الاستخدام في السوائل، تكون تلك المعاوقة مرغوبة، لكن في الهواء، بسبب كبر عدم توافق المعاوقة الميكانيكية – الصوتية، يتم الحصول على جهود خرج صغيرة جدا عند الضغوط الطبيعية للصوت. لتقليل هذه المعاوقة الميكانيكية بشكل ملحوظ دون تخفيض جهد الخرج يمكن جمع لوحين أو قضيبين للحصول على ثنائي الشكل. بمعنى، الثنائي – الشكل هو محول ميكانيكى يعمل بمبدأ يشبه مبدأ "الشريط الثنائي المعدن". يتم لحام الأوجه المستوية للبلورتين معا بحيث عند تطبيق فرق جهد عليهما فإن أحدهما يتمدد والأخر ينكمش. في المقابل، القوة التي تؤثر عموديا على وجه "الشريط الثنائي المعدن" فإنها تسبب قوة انضغاطية كبيرة في أحد الألواح وقوة شد في اللوح الأخر.

تبين الأشكال 6ـ33 و6ـ34 "ثنائي الشكل المثنى" و"ثنائي الشكل لعزم الدوران" على الترتيب. يستخدم النوع الأول قضيبين من القضبان المتوسعة والنوع الأخير يستخدم لوحين من ألواح القص. بشكل عام، يتم تثبيت "ثنائي الشكل المثنى" من كلا طرفيه وتطبق القوة في الوسط، بينما يمك تثبيته عند أحد الأطراف وتطبيق القوة على الطرف الأخر. عموما، يمسك "ثنائي الشكل لعزم الدوران" من ثلاثة زوايا ويتم تطبيق القوة على الزاوية الرابعة. بواسطة هذه الأنواع من

التراكيب، فإن القوة المطبقة كما هو مبين في الأشكال 6ـ33ج و6ـ34د تكافئ القوة الأكبر التي تؤثر عند نهاية قضيب متوسع واحد أو النهاية الطويلة للوح قصى واحد.



الشكل 6ـ33 "ثنائي الشكل المثنى" (أ) بلورتين قضيب – متوسع جاهزين للحام معا لتكوين 34 "ثنائي الشكل المثنى". (ب) يسبب تطبيق الجهود بقطبيات متعاكسة على البلورات يسبب استطالة للأعلى وتقلص في العرض كما يسبب تقصير للأخر مع اتساع في العرض. (ج) عند لحام هاتين البلورتين معا وتطبيق قوة f أو جهود كهربية، فإن البلورة تأخذ الأشكال المبينة.[5]

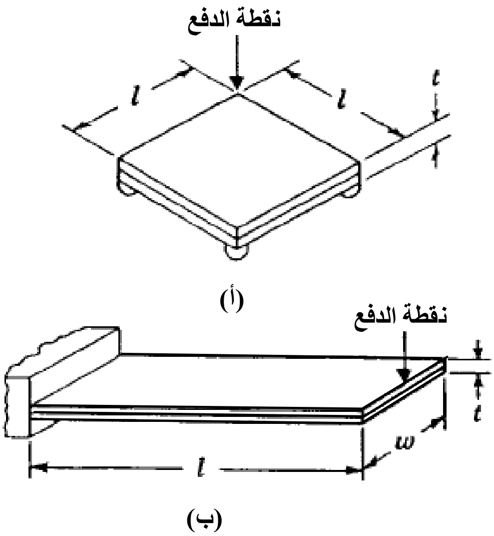


الشكل 6ـ34 "ثنائي الشكل لعزم الدوران" (أ)، (ب) و(ج) تشوه ألواح القص عند تطبيق جهود بقطبيات متعاكسة عبر الأوجه. (د) تم لحام لوحي قص معا لتكوين "ثنائي الشكل لعزم الدوران". عند تطبيق قوة f أو جهود كهربية، فإن ثنائي الشكل يأخذ الشكل المبين.[5]

يمكن عمل أقطاب كهربية لثنائي الشكل بإحدى طريقتين، إما يكون اللوحين على التوالي أو يكونا على التوازي. بالنسبة للتوصيل على التوالي، تكون الأطراف الكهربية هما الرقاقتين الخارجيتين. في حالة التوصيل على التوازي، تكون الرقاقة المعدنية الموجودة بين البلورتين أحد الأطراف الكهربية والرقاقتين الخارجيتين متصلتين معا تكونا الطرف الأخر. لثنائي شكل

التوالي ربع سعة ثنائي شكل التوازي وضعف جهد الخرج.

بالرجوع إلى الدائرة المبينة في الشكل 6ـ30أ (لا يمكن استخدام الدائرة المبينة في الشكل 6ـ30 ب لثنائي الشكل المثبت الموصوف سابق). بالنسبة لثنائيات الشكل العزم المربع المصنوعة من ألواح قص من ملح روشيل مقطوعة – في محور X مثل المبينة في الشكل 6ـ35أ متصلة كهربيا على التوازي، تكون حجوم العنصر عند 30^oC تكون $N_M = 0.143/l$، $C_M = 2.87\times10^{-10}\, l^2/t^3$، $M_M = 262 l^2 t$، و $C_E = \beta\times1.18 l^2/t\times10^{-8}$. تم تدوين المعامل β في الشكل 6ـ36 ويساوى 1.0 عند 30^oC. تكون أبعاد l، و t بالمتر. عند توصيل الألواح كهربيا على التوالي فإن قيمة N_M تتضاعف وقيمة C_E تقل إلى ربع قيمة حالة التوازي.



الشكل 6ـ35 ثنائيات الشكل. طريقة تثبيت، أبعاد، ونقط تطبيق القوة في حالة: (أ) ثنائي – شكل مربع العزم و(ب) ثنائي الشكل المثنى المستطيل.

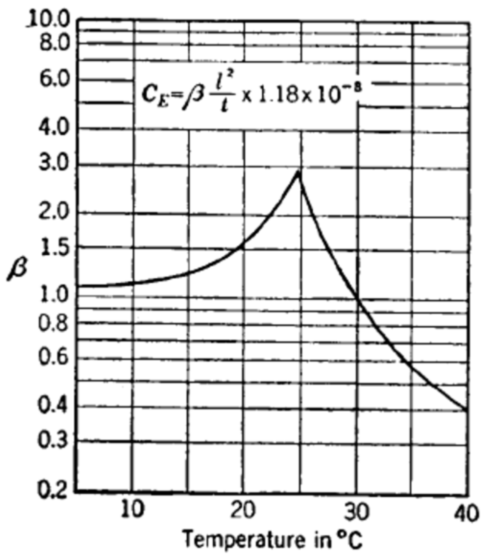
في حالة ثنائيات الشكل المربعة – العزم المصنوعة من ADP (أنظر للشكل 6ـ35أ) المتصلة كهربيا على التوازي فإن حجوم العنصر تكون على الصورة $N_M = 0.250/t$، $C_M = 4.45\times10^{-10}\, l^2/t^3$، $M_M = 228 l^2 t$، و $C_E = 507 l^2/t\times10^{-12}$.

في حالة ثنائيات الشكل المثنية المصنوعة من ملح روشيل (أنظر للشكل 6ـ35ب) والمتصلة كهربيا على التوازي فإن حجوم العنصر تكون على الصورة $N_M = 0.0735 l/wt$،

$C_M = 179\times10^{-12}\, l^3/wt^3$ ، $M_M = 407 lwt$ ، و $C_E = 1.18\times10^{-8} lw/t$. تكون أبعاد l ، w ، و t بالمتر. عندما تكون الألواح متصلة كهربيا على التوالي، فإن قيمة N_M تتضاعف وقيمة C_E تقل إلى ربع قيمة حالة التوازي. يجب استخدام الدائرة المبينة في الشكل 6ـ30أ.

في حالة ثنائيات الشكل المثنية المصنوعة من ADP (أنظر للشكل 6ـ35ب) والمتصلة كهربيا على التوازي فإن حجوم العنصر تكون على الصورة $N_M = 0.1523 l/wt$ ، $C_M = 199\times10^{-12}\, l^3/wt^3$ ، $M_M = 435 lwt$ ، و $C_E = 5.09\times10^{-10} lw/t$.

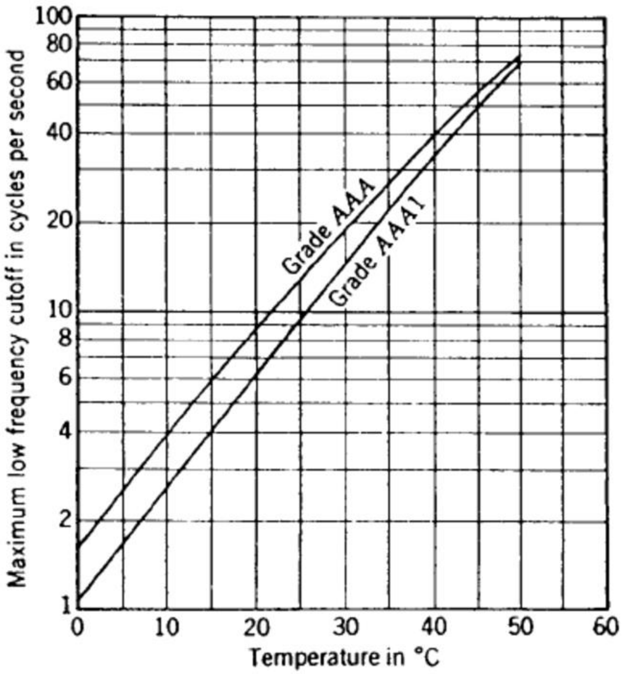
يكون التشوه غير الخطى الناتج بواسطة بلورات ADP وLH صغير جدا. لكن، ملح روشيل يستثنى من ذلك. في مدى درجة الحرارة من -18^oC إلى $+24^oC$ تظهر بلورات ملح روشيل تأثيرات تخلفيه في العلاقة بين القوة المطبقة والجهد المتولد عبر مقاومة حمل صغيرة. تنشأ تأثيرات التخلفية هذه في السعة الكهربية C_E وتكون غير ذات أهمية عندما يعمل الميكروفون بالقرب من حالة الدائرة المفتوحة، مثل حالة دخل مرحلة تابع المهبط للأنبوبة المفرغة. في الميكروفونات التي تعمل عند مستويات الصوت الطبيعية، تكون تأثيرات التخلفية لملح روشيل مهملة حتى عندما تكون البلورة محملة.



الشكل 6ـ36 معامل التناسب β في تعبير السعة الكهربية C_E لثنائي شكل مقطوع – في محور X ومربع العزم من ملح روشيل ومثبت كما هو مبين في الشكل 6ـ35(أ). [5]

لكل البلورات مقاومة نوعية حجمية تظهر كمقاومة على التوازي مع الأطراف الكهربية للبلورة. هذا المعامل ليس له أهمية عملية عند درجات الحرارة المعتادة ما عدا في بلورات ADP. (المقاومة النوعية الحجمية هي المقاومة بالأوم المقاسة بين الوجهين لوحدة الحجوم).

في حالة بلورات ADP، تزداد المقاومة النوعية الحجمية مع درجة الحرارة، كما يرى من الشكل 6ـ37. المحور الصادى في هذا الرسم هو تردد القطع، وهو التردد الذي تتساوى عنده المفاعلة والمقاومة المقاستين عبر الوجهين للوح البلورة.



الشكل 6ـ37 أقصى تردد قطع– منخفض متوقع في الدورات لبلورات ADP(PN) كدالة في درجة حرارة الوسط بالدرجة المئوية. يعرف تردد القطع بأنه التردد الذي تتساوى عنده المفاعلة السعوية مع المقاومة (كل مقاس بين نفس الوجهين).[5].

تكون الضوضاء – الذاتية المتولدة بواسطة الميكروفون الكهروستاتيكي هي الضوضاء المتولدة بواسطة المقاومة الكهربية المستمرة للبلورة أو للعزل الكهربي المحولة (المتخلصة) من السعة C_E . علاوة على ذلك، مقاومة الحمل سوف تساهم في الضوضاء لكونها على التوازي مع المقاومة الداخلية. يتناقص مستوى طيف الضوضاء – الذاتية بمعدل 6 ديسيبل

لكل أوكتاف حالما تصبح المفاعلة أقل من المقاومة الكلية للتوازي (خارجية وداخلية). إن البلورة التي تتلف بواسطة الحرارة أو الرطوبة من المحتمل أن يكون لها ضوضاء داخلية عالية.

لا تؤثر درجة الحرارة في السعة الكهربية لبلورات ملح روشيل والمقاومة النوعية لبلورات ADP، لكن قد تؤدى أيضا إلى تلف البلورات بشكل دائم. تم تدوين البيانات التي تبين أقصى درجة حرارة تقريبية آمنة، درجات الحرارة للتسرب الكبير، ودرجات الحرارة للتلف التام في الجدول 6ـ1.

تتأثر البلورات بالرطوبة، ويمكن رؤية هذا من الجدول 6ـ1. يكون هذا حقيقي في البلورات من نوع ملح روشيل. أن ملح روشيل كيميائيا هو تبلور ترترات البوتاسيوم صوديوم مع أربعة جزيئات ماء. إذا كانت الرطوبة منخفضة جدا (أقل من 30 ٪)، فإن البلورة تجف من الماء بالتدريج وتتحول إلى مسحوق. . إذا كانت الرطوبة مرتفعة جدا (أأعلى من 84 ٪)، فإن البلورة تذوب بالتدريج. إن كلتا العمليتان غير قابلة للانعكاس. إن طلاءات الحماية للبلورات الحديثة العهد تعطى تقريبا حماية كاملة ضد تأثيرات الرطوبة العالية جدا.

لفحص البلورة لتقرير كون حالتها طبيعية من عدمه، قم بقياس المقاومة النوعية والسعة الكهربية لها، مع مراعاة عدم تطبيق جهود كبيرة عليها لأنها تؤدى إلى كسر البلورة. إذا كانت السعة أقل بكثير من القيمة الطبيعية، فإن البلورة تكون قد جفت. إذا كانت المقاومة النوعية منخفضة جدا والسعة كبيرة جدا فإن البلورة تكون قد تحللت (ذابت) جزئيا أو كليا. إذا كانت المقاومة النوعية منخفضة وسعة التوازي لم تتغير، يكون سبب هذا حدوث تسرب سطحى.

ميكروفونات سيراميك تيتينات الباريوم

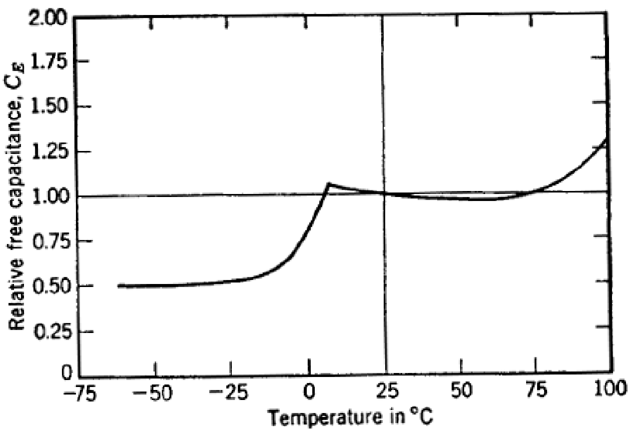
الشكل الحديث والمفيد من المواد الكهروضغطية عبارة عن سيراميك مصنوع من **تيتينات الباريوم**. يثنى السيراميك كهروضغطيا بواسطة الاستقطاب الدائم له بواسطة فرق مجال كهروستاتيكي عالى يتراوح بين 40000 إلى 60000 فولتت/البوصة لمدة عدة دقائق. المجال الأقل يكون مرضيا إذا تم عمل استقطاب عند درجات حرارة مرتفعة. لتيتينات الباريوم نقطة كورى مثل ملح روشيل، ما عدا أنها تحدث عند $120^{o}C$، وهي أعلى بكثير من مدى التشغيل الطبيعي للميكروفون. يوجد شذوذ العازل الكهربي أيضا بالقرب من $12^{o}C$.

يمكن استخدام ميكروفونات تيتينات الباريوم بشكل متبادل مع ميكروفونات البلورة، غير أن حساسيتها تتراوح بين 6 و8 ديسيبل أسفل ميكروفونات أنواع ملح روشيل أو ADP. لا تؤثر تغيرات درجة الحرارة في ثابت العزل الكهربي بشكل كبير.

تتميز تيتينات الباريوم عن المواد البلورية الموصوفة من قبل في أن لها ثابت عزل أكبر منه في حالة ملح روشيل، ويتغير قليلا جدا مع درجة الحرارة في المدى بين 10+ و80 درجة مئوية. تكون المطاوعة الميكانيكية C_M ونسبة محول الطاقة N_M أقل منها لملح روشيل. وحدتين متوسع – طول مصنوعين من ملح روشيل وتيتينات الباريوم، على الترتيب، واللتان تم تصميمهما بحيث يكون لهما نفس السعة والمطاوعة الميكانيكية عند 15^o C سوف تختلفتان في الحساسية بمقدار يتراوح من 12 إلى 16 ديسيبل، وتكون وحدة تيتينات الباريوم الأقل حساسية بين الإثنين.

تظهر سيرامكيات تيتينات الباريوم تناقص بطيء في ثابت العزل والفي الكهروميكانيكية مع تقدم العمر. يعتقد أن التناقص في كل كمية يكون أقل من 10٪، بمعنى 1.0 ديسيبل، خلال السنة الأولى بعد التصنيع وبضع أجزاء مئوية فقط لكل سنة لاحقة.

يبين الشكل 38.6 السعة غير المثبتة الحرة C_E كدالة في درجة حرارة وحدة سيراميك تيتينات الباريوم نسبة إلى السعة الحرة لدرجة الحرارة 25^o C.



الشكل 38.6 سيراميك تيتينات الباريوم. السعة الحرة النسبية C_E كدالة في درجة الحرارة.[5] تعتمد الطبيعة الدقيقة لهذا المنحنى على الطريقة التي فيها ينثنى العازل الكهربي بطريقة كهروضغطية.

بالإشارة إلى الشكل 6ـ30 للقضيب متوسع – الطول المصنوع من تيتينات الباريوم مثل المبين في الشكل 6ـ32أ، تكون حجوم العنصر على الصورة $N_M = 0.051/w$ ، $C_M = 10.2\times10^{-12}\, l/wt$ ، $M_M = 2260lwt$ ، و $C_E(\text{at } 25^\circ\text{C}) = 1.5\times10^{-8} lw/t$. تكون أبعاد l ، w ، و t بالمتر.

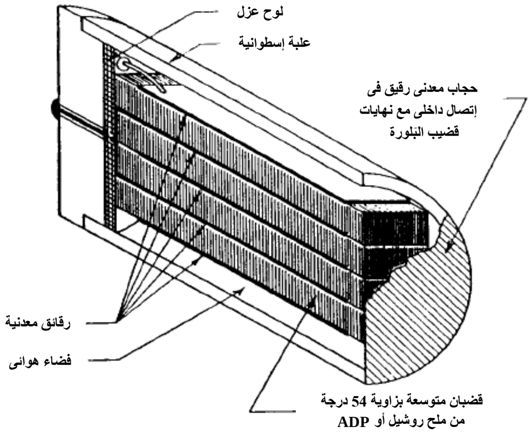
في حالة قضيب تيتينات الباريوم المتوسع ـ السمك مثل المبين في الشكل 6ـ32ب، تكون حجوم العنصر على الصورة $N_M = 0.0127t/lw$ ، $C_M = 8.13\times10^{-12}\, l/wt$ ، $M_M = 2260lwt$ ، و $C_E(\text{at } 25^\circ\text{C}) = 1.5\times10^{-8} lw/t$. تكون أبعاد l ، w ، و t بالمتر.

بالإشارة إلى الشكل 6ـ30أ لثنائي الشكل المثنى المصنوع من تيتينات الباريوم مثل المبين في الشكل 6ـ35ب والألواح فيه تكون متصلة كهربيا على التوالي، فإن حجوم العنصر تكون $N_M = 0.0068l/wt$ ، $C_M = 40.6\times10^{-12}\, l^3/wt^3$ ، $M_M = 1530lwt$ ، و $C_E(\text{at } 25^\circ\text{C}) = 1.28\times10^{-8} lw/t$.

يستجيب محول طاقة تيتينات الباريوم أيضا للضغوط الهيدروستاتيكية مثل التي سيتم الحصول عليها إذا كان لوح السيراميك معلق بحرية في الهواء أو في سائل. إن الدائرة المبينة في الشكل 6ـ30أ تستعمل هنا على نفس النمط ماعدا أن العناصر الصوتية تستبدل مكان العناصر الميكانيكية. في هذه الحالة، يسمى محول الطاقة متوسع حجمي، وتكون حجوم العنصر هي $N_A = 0.0022t$ volt/newton/m^2 ، $C_A = 12.2\times10^{-12}\, lwt$ m^5/newton ، و $C_E = 1.5\times10^{-8} lw/t$ Farads . الأبعاد l ، w ، و t تكون بالمتر.

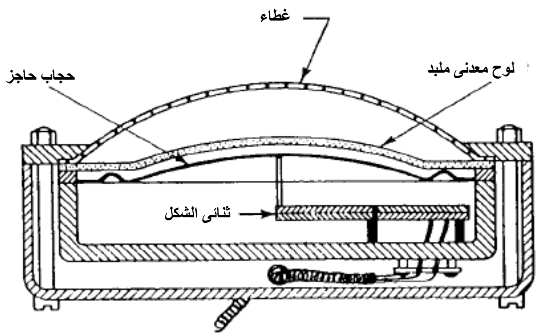
استخدامات محولات الطاقة الكهروضغطية.

تبين الأشكال من 6ـ39 إلى 6ـ42 الطرق الى تشارك بها محولات الطاقة الكهروضغطية في الميكروفونات. يبين الشكل الأول من هذه الأشكال مخطط لميكروفون يستخدم قضبان من ADP أو من ملح روشيل متوسعة مقطوعة – بزاوية 45^o أو قضبان من تيتينات الباريوم متوسعة – الطول. يسبب ضغط الصوت قوة تؤثر على نهاية الألواح الكهروضغطية، ويتولد جهد بسبب التغيرات في أطوالها. تكون جوانب الألواح حرة التمدد في الفضاء الهوائى.



الشكل 39.6 شكل تثبيت قضبات متوسعة لتكوين ميكروفون ضغط. تتصل الرقائق بحيث تكون كل المكثفات على التوازي. يؤثر مجال الصوت على حجاب معدنى رقيق ويسبب تمدد أو انكماش القضبان على امتداد أطوالها. (تم إعداد الرسم من مخطط بواسطة معامل ماسا، Massa).

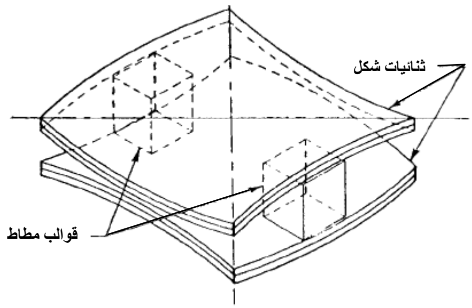
في الشكل 40.6 يتصل الحجاب الحاجز إلى عنصر ثنائي الشكل العزمى بواسطة قضيب قصير. يكون ثنائي الشكل مثبت بشكل ملائم من الثلاثة زوايا لكي تطبق القوة بالأسلوب المبين في الشكل 35.6أ. يكون اللوح المعدنى المتلبد الموجود في مقدمة الحجاب هو المقاومة الصوتية التي تخمد الرنين للنظام الميكانيكى.



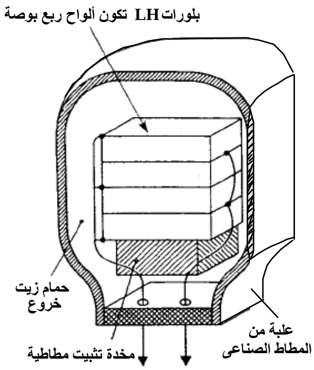
الشكل 40.6 ميكروفون بلورى من نوع الحجاب الحاجز يستخدم ثنائي شكل عزمى. اللوح المعدنى الملبد هو عنصر تخميد صوتى.

يبين الشكل 41.6 شكل أخر لتثبيت ألواح ثنائي الشكل. هنا، يكون عنصرين من ثنائي الشكل المثنى – المربع محمولين بشكل منفصل بواسطة كتلتين مطاطيتين. يتم تغليف كامل التركيب (المجموعة) بسترة ورقية مشبعة بالشمع، الأمر الذي يشكل "حجابين حاجزين" بينهما فضاء هوائي. تسبب زيادة ضغط الصوت

تشويه في الألواح كما هو مبين في الشكل 6ـ41. تكون لهذا التشويه طبيعة توليد فرق جهد عبر الأقطاب الكهربائية للألواح الكهروضغطية المربوطة (المثبتة). يكون الشكل الرابع للتثبيت المناسب لاستخدام في الألواح الكهروضغطية للتغيرات الهيدروستاتيكية في الضغط كما هو مبين في الشكل 6ـ42. في الشكل تظهر المجموعة المكونة من أربعة ألواح كبريتات الليثيوم مغمورة في زيت خروع. تعمل العلبة الخارجية المرنة كحجاب حاجز وأيضا على الاحتفاظ بزيت الخروع. ينتقل ضغط الموجود على السطح من الخارج إلى العلبة وإلى حمام زيت الخروع وبالتالي إلى العنصر الموجود بالداخل.



الشكل 6ـ41 ميكروفون خلية صوت بلورية. تتولد قوى الضغط والشد المطلوبة في كل لوح من الألواح البلورية الأربعة عندما تؤثر القوة عند مراكز وجوانب عنصري ثنائي الشكل المثنى.



الشكل 6ـ42 مخطط لميكروفون هيدروستاتيكي يستخدم بلورات كبريتات الليثيوم كعناصر نشطة. يعمل حمام زيت الخروع على حمل الضغط الصوتى بشكل موحد إلى كل سطوح البلورة. تم أخذ البيانات على مجموعة تكعيبية مكونة من 6 ألواح ربع بوصة متصلة على التوازي وعرض الجانب 0.04 بوصة. تكون السعة حوالي 10^{-12} فاراد وجهد الدائرة المفتوحة يتراوح من ـ9 إلى 1 فولت لكل داين لكل سم^2.[5]

الجزء السادس عشر - ميكروفونات المجموعة والمنحدر

7.6 ميكروفونات منحدر – الضغط

السمات العامة

يسمى ميكروفون الشريط (ribbon microphone) أيضا بخشبة الإسناد العرضية. لميكروفون الشريط نفس الحساسية ونفس المعاوقة تقريبا مثل ميكروفون الملف-المتحرك عندما يستخدم مع محول مناسب متوافق-المعاوقة. بسبب أن له نموذج التوجيهية له شكل الرقم 8، فإنه يستخدم على نطاق واسع في العمل الإذاعي وفي تطبيقات الخطاب العام لإزالة الأصوات الغير مرغوبة الواقعة في الفضاء. يوضع الميكروفون عموديا على تلك الأصوات. يستخدم هذا الميكروفون أيضا لتوليد نوعية "حنجرية" أو نوعية "تمييز ترددي، bassy" إلى الأصوات. عيب ميكروفون الشريط هو أنه مالم يتم إحكام حجب الريح المطبق يكون صاخب جدا في أغلب الأحيان عندما يستعمل في الهواء الطلق، بمعنى أنه حساس جدا لتيارات الهواء.

التركيب

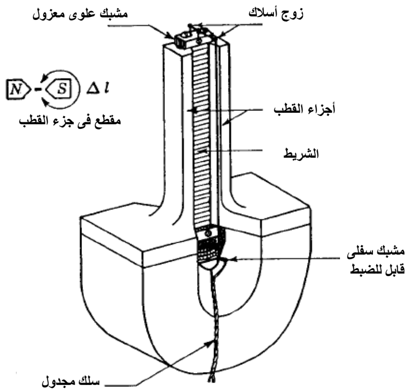
يبين الشكل 6-43 شكل نموذجي لميكروفون منحدر – الضغط. يتركب هذا الميكروفون من شريط له ردد رنين منخفض جدا معلق في شق في حاجز. يكون المجال المغناطيسي عمودي على الشق بحيث تسبب حركة الشريط ظهور فرق جهد عبر طرفيه. بهذه الطريقة، فإن الموصل المتحرك يعمل أيضا كحجاب حاجز. في التصميم الحديث، قد يكون طول عنصر الشريط بوصة واحدة، وعرضة $\frac{1}{16}$ بوصة، وسمكه يساوى 0.0001 بوصة مع تخليص (خلوص) مقداره 0.003 بوصة عند كل جانب.

من المعادلة 6-11 نرى أن فرق الضغط الذي يعمل على تحريك الحجاب الحاجز هو،

$$p_R = f_R / S = u\,\omega \rho_o\, \Delta l \cos\theta \qquad 6\text{-}36$$

حيث f_R هو ج م م القوة المؤثرة لتحريك الشريط، u ج م م سرعة الجسيم في الموجة في اتجاه انتشار الموجة، S المساحة الفعالة للشريط، Δl هو المسافة الفعالة بين الجانبين، و θ هي زاوية العمودي

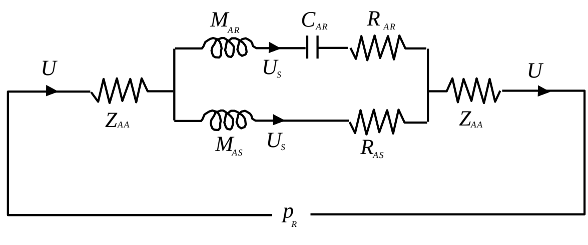
على الشريط مع اتجاه سفر الموجة. تكون هذه المعادلة صالحة طالما كان ارتفاع الحجاب الحاجز اقل من نصف الطول الموجي تقريبا



الشكل 43.6 مخطط لتركيب الشريط والتركيب المغناطيسي لميكروفون سرعة.

الدائرة التناظرية.

يبين الشكل 44.6 الدائرة المكافئة (تناظر معاوقة) لهذا النوع من الميكروفونات. p_R هو فرق الضغط الذي سوف يتواجد بين جانبي الشريط اذا تم جعلة مقيد (ثبت) ولا يمكن أن يترسب حوله الهواء. Z_{AA} هي المعاوقة الصوتية للوسط المرئي من جانب واحد من جوانب الشريط، $U_R = Su_r$ تساوى حجم سرعة الشريط، u_r تساوى السرعة الخطية للشريط، M_{AR} ، C_{AR} ، و R_{AR} هي الثوابت الصوتية للشريط نفسه (على سبيل المثال، $M_{AR} = M_{MR} / S^2$ ، حيث M_{MR} كتلة الشريط)، M_{AS} و R_{AS} هي الكتلة الصوتية والمقاومة على الترتيب، للشقوق الصغيرة الضيقة عند أي من نهايات الشريط، و U_S هي سرعة الحجم لحركة الهواء خلال الشق الصغير على جانبي الشريط.



الشكل 44.6 الدائرة الصوتية التناظرية لميكروفون الشريط (تناظر معاوقة).

على مدى كل منطقة التردد تقريبا، تكون معاوقة الاشعاع Z_{AA} مفاعلة كتلة نقية المقابلة

للكتلة الصوتية M_{AA} (انظر المعادلة 5ـ31). في الميكروفون المصمم بشكل صحيح، $U_S << U_R$. أيضا يعمل الميكروفون فوق تردد الرنين بحيث $\omega M_{AR} >> 1/(\omega C_{AR})$. في العادة أيضا، $\omega M_{AR} >> R_{AR}$. بالتالي تبسط الدائرة المبينة في الشكل 6ـ44 الى كتلة صوتية منفردة لها المقدار $2M_{AA} + M_{AR}$.

عند استخدام تناظر الحركية واعتبار الدائرة الكهربية، نحصل على الدائرة الكاملة المبينة في الشكل 6ـ45. هنا، $M_{MA} = M_{AA}S^2$ ، $M_{MR} = M_{AR}S^2$ ، و B هو كثافة الفيض، l طول الشريط، و $f_r = p_r S$.

الأداء.

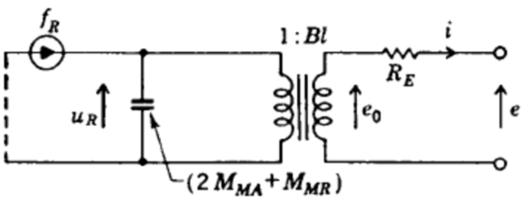
من حل المعادلة 6ـ45 وجد أن جهد الدائرة المفتوحة e_o للميكروفون يكون على الصورة،

$$e_o = \frac{Bl\, f_R}{j\omega(2M_{MA} + M_{MR})} \qquad 6\text{-}39$$

بالتعويض بالمعادلة 6ـ38 في المعادلة 6ـ39 نحصل على،

$$|e_o| = |u|\,\frac{(Bl)\rho_o\,\Delta l}{2M_{MA} + M_{MR}}\,S\cos\theta \qquad 6\text{-}4$$

يتناسب جهد الدائرة المفتوحة طرديا مع مركبة سرعة الجسيم العمودية على مستوى الشريط. في الميكروفون الجيد – التصميم، تبقى هذه العلاقة حقيقية على مدى الترددات من 50 إلى 10000 هيرتز. يتراوح تردد الرنين السفلى بين 15 إلى 25 هيرتز. تبدأ تأثيرات التشتت عند الترددات القريبة من 2000 هيرتز لكن يمكن موازنتها بالتشكيل الملائم لقطع القطب المغناطيسي.



الشكل 6ـ45 دائرة مناظرة كهروميكانيكية مبسطة لميكروفون الشريط (تناظر – حركية).

8.6 ميكروفونات مجموعة الضغط ومنحدر – الضغط

<u>محولات الطاقة لمجموعة الضغط الكهربية ومنحدر الضغط.</u>

من طرق الحصول على نموذج توجيهي له قمة منفردة (المسمى بالمميزة غير الموجهة) توجد طريقة الجمع الكهربي لمخارج الميكروفون الضغطي وميكروفون منحدر الضغط.

يجب وضع الوحدتين في الفضاء قريبتين من بعضهم البعض بقدر الإمكان لكي تكون مميزة الاتجاهية الناتجة مستقلة عن التردد بشكل جوهري.

تستخدم الميكروفونات التي لها مميزة لا-اتجاهية بالدرجة الأولى في التطبيقات الإذاعية والخطاب – العام، حيث يكون من المطلوب تخميد الأصوات غير المرغوبة التي تقع بالنسبة للميكروفون على 180^o من الأصوات المرغوبة. فيما يخص المعاوقة والحساسية فإن هذا النوع من الميكروفونات التي لها نموذج توجيهية قلبي تكونا مثل معاوقة وحساسية الميكروفون الشريطي أو ميكروفون الملف-المتحرك عند استخدام محولات متوافقة – المعاوقة.

يعطى مقدار جهد خرج الدائرة المفتوحة لميكروفون الضغط في المدى الترددي التي تكون الفي فيه "مستوية" بالمعادلة

$$e_o = A\,p \qquad 6\text{-}41$$

سلطان

تكون المعادلة التي تعطى جهد خرج الدائرة المفتوحة لميكروفون منحدر – الضغط من نوع الشريط أو من النوع المغناطيسي في نفس مدى التردد على الصورة.

$$e'_o = C\,p\cos\theta \qquad 6\text{-}42$$

سلطان

بجمع المعادلتين 6ـ41 و6ـ42 وجعل $C / A = B$ نحصل على،

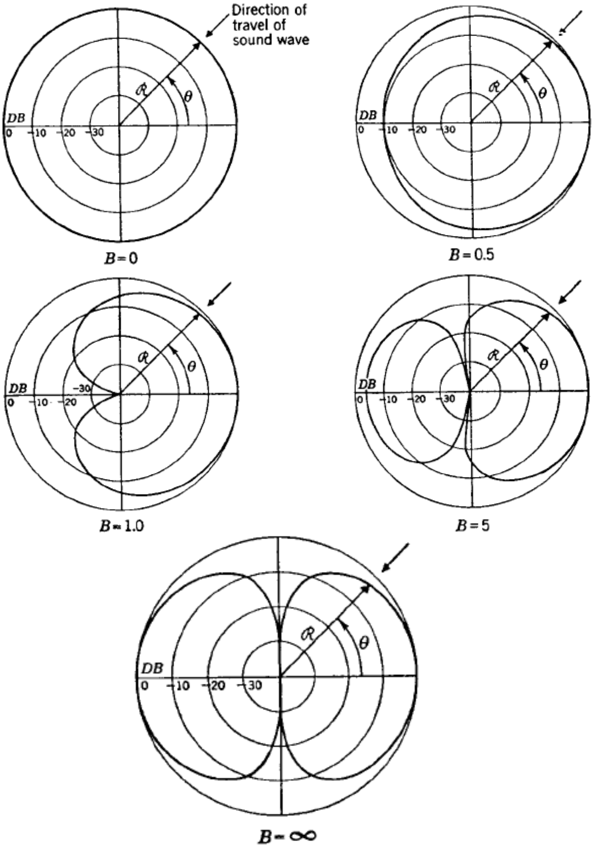
$$e_o = A\,p\,(1 + B\cos\theta) \qquad 6\text{-}43$$

سيكون مقدار B عدد موجب حقيقي فقط إذا كان e_o و e'_o لهما نفس الطور.

سوف تعتمد المميزة الاتجاهية للميكروفون الذي يطيع المعادلة 6ـ43 على قيمة المقدار B. عند $B = 0$ يكون الميكروفون من النوع اللا-اتجاهي. عند $B = 1$ يكون الميكروفون من النوع

القلبي (أي يكون نموذج التوجيهية على شكل القلب). عند $B = \infty$ يكون الميكروفون من نوع شكل 8 (أي يكون نموذج التوجيهية على شكل الرقم 8). يبين الشكل 6ـ46 المميزات التوجيهية عند 5 قيم لـ B .

يكون الجهد e'_o دالة في $k\tau$ كما تم مناقشته في الجزء 6ـ3، بالتالي سوف يتغير الجهد e_o (كما هو معطى بالمعادلة 6ـ43) كدالة في التردد لقيم $\omega r / c$ الصغيرة، حيث r هي المسافة بين الميكروفون ومصدر صوتي صغير. هنا، كما في حالة ميكروفون منحدر – الضغط، سوف صوت الشخص نوعية جهورية (تمييز ترددي) عندما يقف قريبا جدا من الميكروفون.



الشكل 6ـ46 منحنيات التعبير $R = 20\log[(1+B\cos\theta)/(1+B)]$ **كدالة في الزاوية** θ **عند** $B = 0, 0.5, 1.0, 5.0, \text{ and } \infty$.

مجموعة صوتية من ميكروفونات الضغط ومنحدر – الضغط

تم وصف مثال لتصميم صوتي يستجيب لكل من الضغط ومنحدر الضغط في الموجة الصوتية مبكرا في الجزء 6-3. تكون نماذج التوجيهية لهذا النوع من التصميم مثل المبينة في الشكل 6-46.

لكي يكون لهذا النوع من الميكروفونات في مستوية كدالة في التردد عندما تكون p_{rms} ثابتة (بمعنى أن ضغط الصوت يكون ثابت عند كل ترددات الموجة الصوتية)، يجب اختيار محول الطاقة الذي له جهد خرج للقوة التفاضلية الثابتة المؤثرة على الحجاب يتناسب عكسيا مع الكمية a والمعرفة بالمعادلة 6-19، بمعنى أن

$$e_o = \frac{1}{|a|} = \left| \frac{Z_{AD} - j(R_A + Z_{AD})/\omega C_A R_A}{Z_{AD}} \right| \qquad \text{سلطان } 6\text{-}44$$

كمثال، دعنا نأخذ حالة الميكروفون الذي له $Z_{AD} >> R_A$ و $1 << 1/\omega C_A R_A$. في هذه الحالة يجب أن تكون في محول الطاقة تتناسب مع

$$\frac{1}{|a|} = \frac{1}{\omega C_A R_A} = \frac{cB}{\Delta l \omega} \qquad \text{سلطان } 6\text{-}45$$

حيث B تعطى بالمعادلة 6-17.

مرة أخر نكرر القول أن محول الطاقة يجب ان يكون له جهد خرج عند محصلة قوة ثابتة تؤثر على الحجاب الحاجز يتناسب عكسيا مع التردد، إذا كان مطلوب في ترددية مستوية. هذه هي حالة محول طاقة الشريط أو الملف – المتحرك فوق تردد الرنين الطبيعي للحجاب.

مراجع هذا الباب

1- From, Beranek, "Acoustic Measurements," John Wiley & Sons, Inco., New York, 1949.

2- From , Marshall and Romanow, A non-Directional Microphone, Bell Syst. Tech. J. 15: 405-423 (1936).

3- From, Beranek, " Acoustic Measurements," John Wiley & Sons, Inco., New York, 1949 and coutesy of Altec Lansing Corporation.

4- تباع بلورات فوسفات الأمونيوم ثنائي الهيدروجين (ADP) تحت الاسم التجارى PN وبلورات كبريتات الليثيوم تحت الاسم LH.

5- From, Courtesy of Brush Electronics Company.

6- توجد المناقشة التفصيلية لأداء العوازل الكهروضغطية وتشابهها مع المواد الحديدومغناطيسية في كتاب

R.H. Bolt," Sonics" ," John Wiley & Sons, Inco., New York.

7- Bimorph is registered trade – mark of Brush Electronics Company, Cleveland, Ohio.

8- Olson, Elements of Acoustical Engineering, 2d ed., p. 239, D. Van Nostrant company, Inc., 1947.

الباب السابع

سماعات المشعاع المباشر

DIRECT – RADIATOR LOUDSPEAKERS

الجزء السابع عشر – النظرية الأساسية لسماعات المشعاع المباشر

1.7 مقدمة

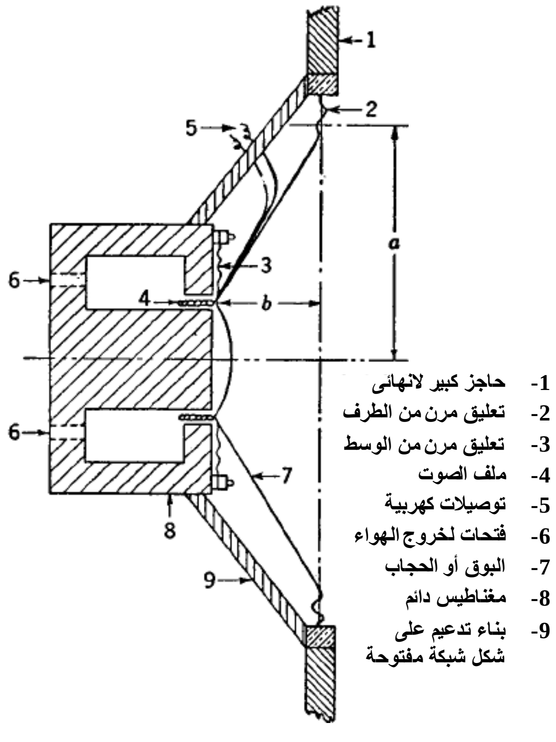
السماعة الصوتية هي محول طاقة كهرومغناطيسي لتحويل الإشارات الكهربية إلى أصوات. يوجد نوعين رئيسيين من السماعات: السماعات التي يشع فيها السطح المهتز (المسمى بالحجاب الحاجز) الصوت مباشرة إلى الهواء، وتلك التي يوجد فيها بوق (مخروط) بين الحجاب والهواء. إن سماعات المشعاع المباشر تستخدم في معظم أجهزة الاستقبال الراديوية المنزلية، في الفونوغراف، وفي الأنظمة الصغيرة ذات الاستخدام العام.

المزايا الرئيسية لنوع المشعاع – المباشر هي: 1ـ صغر الحجم، 2ـ قلة التكلفة، و3ـ الاستجابة المقبولة على مدى التردد العريض نسبيا. العيوب الرئيسية هي: 1ـ انخفاض الكفاءة، 2ـ ضيق نموذج التوجيهية عند الترددات العالية، و3ـ كثيرا ما يكون منحنى الاستجابة شاذ عند الترددات العالية. في حالة أجهزة استقبال الراديو المنزلية حيث تكون القدرة الصوتية الصغيرة مطلوبة وعندما لا يكون المستمعين بشكل عام صارمين جدا، فإن الفوائد تكون أكثر بكثير من العيوب. في الانظمة الصوتية للمسرح والهواء الطلق، حيث يكون مقدار القدرة الصوتية الكبيرة جدا ضروريا وحيث يكون الفضاء ليس مهما، فإن السماعات ذات الكفاءة العالية من نوع المخروط تستعمل بشكل عام.

يمكن استخدام كل أنواع تحويل الطاقة التي تمت مناقشتها في الباب السابق التي تتعلق بالميكروفونات في السماعات الصوتية. لكن في هذا النص سوف نقتصر على سماعات الملف – المتحرك، وهو النوع الشائع الاستخدام في الراديوهات والأنظمة الموسيقية المنزلية.

2.7 التركيب [1]

يبين الشكل 1.7 مخطط لمقطع عرضى لسماعة نموذجية ذات مشعاع –مباشر. الحجاب الحاجز عبارة عن بوق (مخروط) مصنوع بشكل عام من الورق أو الألمونيوم، ويتم تدعيمه من عند الحافة الخارجية ومن قرب الملف الصوتى الأمر الذي يجعله حر الحركة في الاتجاه المحورى. يولد التيار المار خلال الملف الصوتى قوة دافعة مغناطيسية تتفاعل مع فيض المغناطيس الدائم في فجوة الهواء، وتسبب حركة ترجمية (معبرة عن الإشارات الكهربية الصوتية) لملف الصوت، وبالتالي للمخروط المرتبط به. في العادة يكون المخروط متصلب بالقدر الكافي حتى يكون قادر على التحرك ككل عند الترددات المنخفضة. لكن عند الترددات العالية، تتحرك الاهتزازات من المركز خارجة نحو الحافة على شكل موجات. تكون نتيجة هذه الموجات المتحركة ونتيجة الرنين في المخروط نفسه هي توليد عدم انتظام في منحنى التردد-الاستجابة عند الترددات العالية وتؤثر على كميات الصوت النسبية المشعة في الاتجاهات المختلفة.



الشكل 1.7 مخطط مقطع عرضى في سماعة صوتية ذات مشعاع مباشر بفرض أنها مثبتة في حاجز لانهائى.

في الشكل 7ـ1، تظهر السماعة الصوتية مثبتة في حاجز مستوى مفترض أنه يمتد إلى مالا نهاية. من التعريف، الحاجز هو أى وسيلة من وسائل العزل الصوتى للجانب الأمامى للحجاب الحاجز عن الجانب الخلفى. بغرض التحليل، يمكن اعتبار الحجاب الحاجز للسماعة عند الترددات المنخفضة كما لو كان مكبس له نصف القطر a يتحرك بسرعة منتظمة على كامل سطحه. يكون هذا تقريب مناسب عند الترددات التي عندها تكون المسافة b في الشكل 7ـ1 أقل من عشر الطول الموجى.

7ـ3 الدائرة الكهروميكانيكوصوتية.

قبل رسم مخطط الدائرة للسماعة، يجب أن نعرف العناصر المختلفة المتضمنة في هذه الدائرة. ملف الصوت له مفاعلة ومقاومة، وسوف نشير إليهما بالرموز L و R_E على الترتيب. للحجاب الحاجز وسلك ملف الصوت كتلة كلية M_{MD}. الحجاب مثبت على تعليق مرن من المركز والحافة. يمكن تمثيل التأثير الكلى لهذه التعليقات بمطاوعة ميكانيكية C_{MS} ومقاومة ميكانيكية $R_{MS}=1/r_{MS}$، حيث r_{MS} هي المستجيبية الميكانيكية. تكون فجوة الهواء والفتحات الموجودة على مؤخرة الجزء المركزى من الحجاب الحاجز شبكة صوتية التي في معظم السماعات يمكن إهمالها في التحليل لأن ليس لهم تأثير كبير على أداء السماعة. ومع ذلك، فإن الجانب الخلفي والجانب الأمامى للجزء الرئيسى من الحجاب الحاجز يشع الصوت إلى الهواء المفتوح. تعزى المعاوقة الإشعاعية لكلا الجانبين ويرمز لها بالرمز $Z_{MR}=1/z_{MR}$، حيث z_{MR} هي حركية الإشعاع.

نلاحظ أن جانب واحد من التعليق المرن يكون عند سرعة تساوى الصفر. بالنسبة للمقاومة الميكانيكية يجب أن يكون ذلك حقيقى أيضا لأنها تكون محتواه في التعليقات. نحن بالفعل نعلم من الأبواب السابقة أن جانب واحد من الكتلة وجانب واحد من حركية الإشعاع يجب اعتبار أن لهما سرعة تساوى الصفر. بالمثل، نلاحظ أن الجوانب الأخرى للكتل، المطاوعة، المستجيبية، وحركيات الإشعاع يكون لجميعها نفس السرعة، أى سرعة الملف الصوتى.

من الفحص نكون قادرين على رسم الدائرة الميكانيكية ودائرة التناظر

الكهروميكانيكية باستخدام تناظر الحركية. يبين الشكل 7ـ2أ و7ـ2ب هذه الدوائر على الترتيب. يكون للرموز في هذا الشكل المعانى التالية:

$e_g =$ جهد الدائرة – المفتوحة للمولد (المكبر الصوتى) بالفولت

$R_g =$ مقاومة المولد بالأوم الكهربي

$L =$ الحث الذاتي لملف الصوت بالهنري، مقاس بواسطة حركة ملف صوت معاق، بمعنى عند $u_e =$.

$R_E =$ مقاومة ملف الصوت بالأوم الكهربي، مقاس بنفس الأسلوب مثل L.

$B =$ كثافة فيض فجوة ـ الهواء الثابتة بالوبر لكل متر مربع.

$l =$ طول السلك بالمتر الذي يمثل لفات ملف – الصوت.

$i =$ التيار الكهربي بالأمبير خلال لفات ملف – الصوت.

$f_c =$ القوة بالنيوتن المتولدة بواسطة التفاعل بين القوى الدافعة المغناطيسية المترددة والمستمرة، بمعنى $f_c = Bli$.

$u_c =$ سرعة ملف – الصوت بالمتر لكل ثانية، بمعنى $u_c = e / Bl$، حيث e تسمى القوة الدافعة الكهربية العكسية.

$a =$ نصف قطر الحجاب الحاجز بالمتر.

$M_{MD} =$ كتلة الحجاب الحاجز وملف الصوت بالكيلوجرام.

$C_{MS} =$ المطاوعة الميكانيكية الكلية للتعليقات بالمتر لكل نيوتن.

$1/R_{MS} = \tau_{MS} =$ المستجيبية الميكانيكية للتعليق بالمتر لكل نيوتن ـ ثانية (أوم ميكانيكي في م كجم ث).

$R_{MS} =$ المقاومة الميكانيكية للتعليقات بالنيوتن – ثانية لكل متر (أوم ميكانيكى في م كجم ث).

$Z_{MR} = 1/ Z_{MR} = \Upsilon_{MR} + jx_{MR}$ هي حركية الإشعاع الميكانيكية (أنظر الشكل 5ـ4).

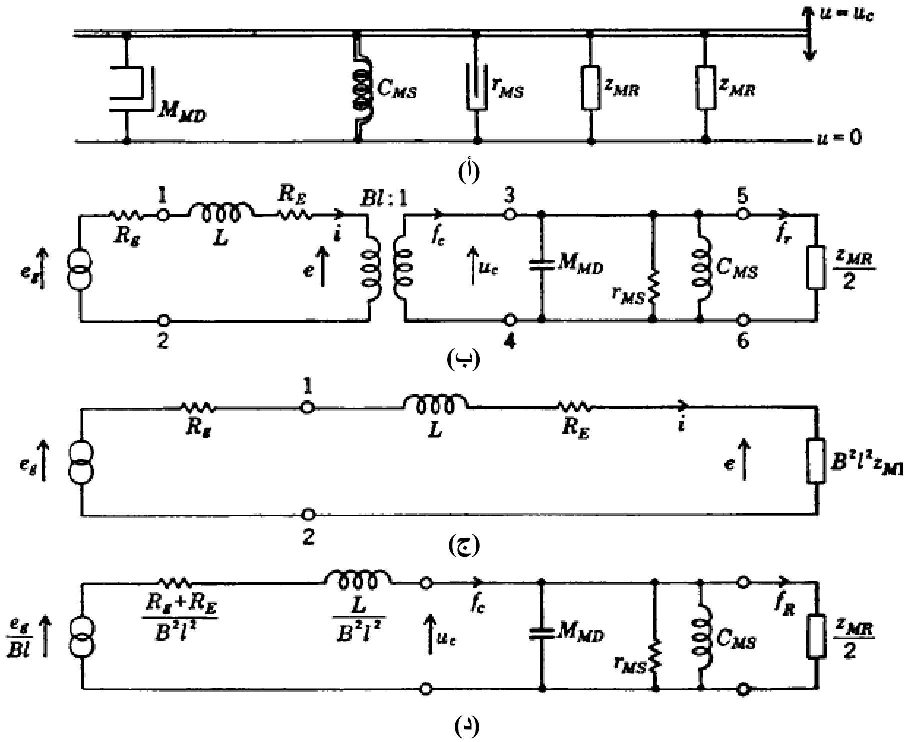
الحرف (التقوس) الألمانى Υ يبين أن Υ_{MR} يتغير مع التردد.

$Z_{MR} = \Re_{AR} + jX_{MR}$ معاوقة الإشعاع الميكانيكية بالنيوتن.ثانية لكل متر (أوم ميكانيكى في م كجم ث) من جهة واحدة للمكبس ذات نصف القطر a المثبت في

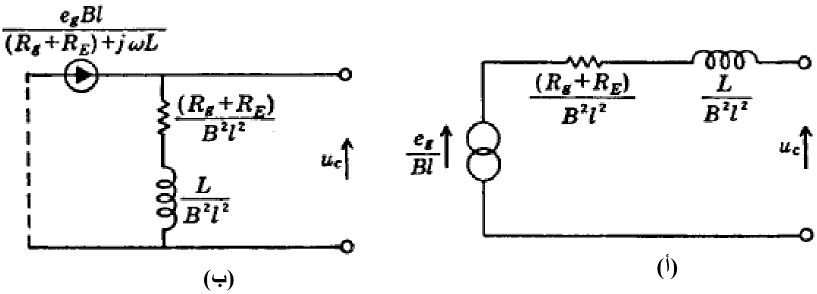
حاجز لا نهائي (أنظر الشكل 5ـ3). الحرف الألماني $\Re$ يبين أن $\Re_{AR}$ يتغير مع التردد.

يبين الشكل 7ـ2ج الدائرة المبينة في الشكل 7ـ2ب مع جلب الجانب الميكانيكي خلال محول إلى الجانب الكهربي. تكون الحركية الميكانيكية $z_{M1} = u_c / f_c$ صفرا أذا تم إعاقة الحجاب بحيث لا توجد حركة ($u_c = 0$) لكن لها قيمة تختلف عن الصفر حينما توجد حركة. لهذا السبب فإن الكمية $B^2l^2z_{M1}$ تسمى عادة معاوقة كهربية متحركة. عند جلب الجانب الكهربي فوق الجانب الميكانيكي فإنه يكون لدينا الدائرة المبينة في الشكل 7ـ2د.

ستكون الدائرة المبينة في الشكل 7ـ2 د أسهل في الحل إذا تم تعديل شكلها. نعتبر أولا الدوائر المكافئة للدائرتين في الشكل 7ـ3أ وب. ثم نعوض في الشكل 7ـ3ب بالدائرة المكافئة المبينة في الشكل 7ـ2د. ثم نأخذ زوج (ثنائي) الشكل 7ـ2د لإيجاد الشكل 7ـ4أ.



الشكل 7ـ2 (أ) دائرة ميكانيكية لسماعة بمشعاع – مباشر. (ب) دائرة تناظر كهروميكانيكي من نوع الحركية، (ج) دائرة كهربية تبين معاوقة كهربية متحركة، (د) دائرة تناظر من نوع الحركية مع الكميات الكهربية المشيرة للجانب الميكانيكي.



الشكل 3.7 الدائرة الكهربية (المشيرة إلى الجانب الميكانيكي) تبين هنا في شكلين متكافئين. تكون الدوائر من نوع الحركية.

يرتبط أداء السماعة الصوتية ذات المشعاع – المباشر بسرعة الحجاب الحاجز ارتباط مباشر. بعد إيجاد الحل للسماعة، يمكننا حساب القدرة الصوتية المشعة والضغط الصوتى المتولد عند أي مسافة معينة من السماعة في المجال – البعيد.

سرعة ملف –الصوت عند الترددات المتوسطة والمنخفضة.

توجد سرعة ملف صوت u_c بإهمال $\omega^2 L^2$ مقارنة مع $(R_g + R_E)^2$ من الشكل 4.7أ،

$$u_c \approx \frac{e_g Bl}{(R_g + R_E)(R_M + jX_M)} \qquad 7\text{-}1$$

حيث

$$R_M = \frac{B^2l^2}{R_g + R_E} + R_{MS} + 2\Re_{MR} \qquad 7\text{-}2$$

$$X_M = \omega M_M = \omega M_{MD} + 2X_{MR} - \frac{1}{\omega C_{MS}} \qquad 7\text{-}3$$

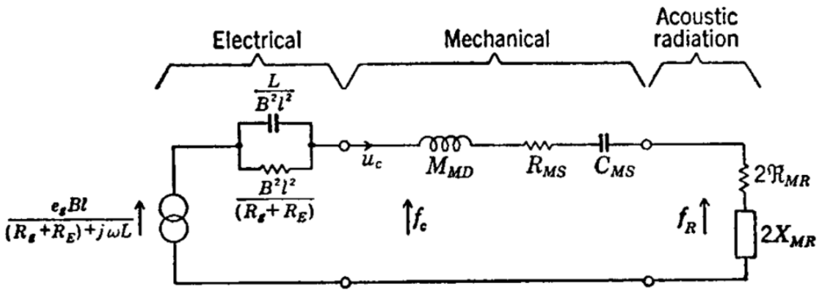
سرعة ملف –الصوت عند الترددات المنخفضة.

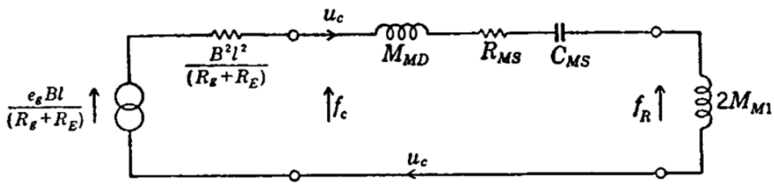
عند الترددات المنخفضة، بالإضافة إلى فرض أن $X_{MR}{}^2 >> \Re_{MR}{}^2$ ، **نحصل من الشكل 4.7ب على،**

$$(X_M)_{\text{low } f} = \omega(M_{MD} + 2M_{M1}) - \frac{1}{\omega C_{MS}} \qquad 7\text{-}4$$

حيث $M_{M1} = 2.67a^3\rho_o$ الكتلة بالكيلوجرام لمساهمة حمل الهواء على جانب واحد للمكبس لمدى التردد الذي يكون فيه $ka < 0.5$. الكمية ka تساوى نسبة محيط الحجاب

الحاجز إلى الطول الموجي. يتم إيجاد سرعة ملف – الصوت من المعادلة 7ـ1 باستخدام المعادلات 7ـ2 و7ـ4 لـ R_M و X_M على الترتيب.





الشكل 7ـ4 (أ) دائرة تناظرية تردد منخفض من نوع المقاومة مع الكميات الكهربية التي تشير إلى الجانب الميكانيكي. أعطيت Z_{MR} في الشكل 5ـ3. الكمية f_c تمثل القوة الكلية المؤثرة في الدائرة المكافئة لتوليد سرعة ملف صوت u_c. (ب) تقريب المسار-الواحد للشكل 7ـ4أ يكون صالحا لـ $\Re_{MR}^2 >> X_{MR}^2$.

7ـ4 قدرة الخرج

القدرة الصوتية المشعة بالواط من كل من الجانب الأماني والجانب الخلفي للسماعة تكون على الصورة،

$$W = |u_c|^2 2\Re_{MR}) \qquad \text{7-5 معادلة}$$

بالتالي، بفرض $\omega^2 L^2 << (R_g + R_E)^2$ نحصل على،

$$W = \frac{2e_g{}^2 B^2 l^2 \Re_{MR}}{(R_g + R_E)^2 (R_M{}^2 + X_M{}^2)} \qquad \text{7-6 معادلة}$$

5.7 ضغط الصوت المتولد عند المسافة r

الترددات المنخفضة

في الباب الرابع بينا أن المكبس الذي له قطر أقل من ثلث الطول الموجي ($ka < 1.0$) يكون في الأساس غير توجيهي عند الترددات المنخفضة. بالتالي، يمكننا تقريبه بنصف كرة لها ج م م السرعة الحجمية يساوي $U_c = S_D u_c$، حيث S_D هي مساحة مسقط مخروط السماعة. المقصود بمساحة المسقط هو πa^2 للشكل 1.7.

من المعادلة 3.4 نرى أن مقدار ج م م الضغط عند نقطة في الفضاء الحر تبعد مسافة r من أي جانب من جوانب السماعة في حاجز لا نهائي هي،

$$|p(r)| \approx \frac{|U_c| f \rho_o}{r} \qquad \text{سلطان } 7.7$$

في كتابة هذه المعادلة تم افتراض أن المسافة r كبيرة بالقدر الذي يكفي أن تكون موضوعة في "المجال – البعيد". بالتالي، يكون الضغط عند r على الصورة،

$$|p(r)| = \frac{e_g Bl S_D f\rho_o}{r(R_g + R_E)\sqrt{R_M{}^2 + X_M{}^2}} \qquad \text{سلطان } 7\text{-}8$$

يتم اشتقاق المعادلة 8.7 أيضا بسهولة من المعادلة 6.7 بملاحظة (من الجدول 1.5) أنه، عند الترددات المنخفضة،

$$\Re_{MR} = \frac{\omega^2 S_D{}^2 \rho_o}{2\pi c} \qquad \text{سلطان } 7\text{-}9$$

و

$$W = 4\pi r^2 I = \frac{4\pi r |p(r)|^2}{\rho_o c} \qquad 7\text{-}10$$

حيث I الشدة عند المسافة r بالواط لكل متر مربع.

الترددات المتوسطة

عند الترددات المتوسطة، حيث يصبح الإشعاع من الحجاب الحاجز موجها ومع ذلك يتذبذب كوحدة واحدة، بمعنى كمكبس صلب، فإن الضغط المتولد عند مسافة r يعتمد على القدرة المشعة ومعامل التوجيهية Q.

تم تعريف معامل التوجيهية Q في الباب الرابع على أنه النسبة بين الشدة على محور معين لمشعاع الصوت إلى الكثافة التي ستتولد عند نفس المكان بواسطة المصدر النقطي الذي يشعّ نفس القدرة الصوتية.

من المعادلة 7ـ10 نرى أنه في حالة المصدر النقطي المشع لكل من الجانبين لحاجز لانهائي،

$$|p(r)| = \sqrt{\frac{W\,\rho_o c}{4\pi r^2}} \qquad \text{7-11} \text{سلطان}$$

بالنسبة للمصدر الموجهه في حاجز لانهائي مثل الحاجز الذي نعتبره هنا فإن،

$$|p(r)| = \sqrt{\frac{W_1 Q\,\rho_o c}{4\pi r^2}} \qquad \text{7-12} \text{سلطان}$$

حيث $W_1 =$ الضغط الصوتي (بالوات) المشع من جانب واحد من السماعة، $Q =$ عامل التوجيهية لجانب واحد من مكبس في حاجز مستوى لانهائي. يتم الحصول على قيم Q من الشكل 4ـ20.
لاحظ هنا أن $W_1 = W/2$ و، عند الترددات المنخفضة حيث لا توجد توجيهية، $Q = 2$، بالتالي تختزل المعادلة 7ـ12 إلى المعادلة 7ـ11 عند الترددات المنخفضة. يوجد ضغط الصوت بالتعويض بالمعادلة 7ـ6 بالقسمة على 2 في المعادلة 7ـ12 نحصل على،

$$|p(r)| = \frac{e_g Bl\sqrt{Q\rho_o \Re_{MR}}}{2r\sqrt{\pi}\,(R_g + R_E)\sqrt{R_M{}^2 + X_M{}^2}} \qquad \text{7-13} \text{سلطان}$$

7ـ6 منحنيات التردد – الاستجابة

يعرف منحنى التردد – الاستجابة للسماعة على أنه التغير في ضغط الصوت أو القدرة الصوتية كدالة في التردد، مع إبقاء بعض الكميات مثل الجهد أو القدرة الكهربية ثابتة. بفحص

المعادلات 7ـ6، 7ـ8، و7ـ13 يتبين أن الكمية $R_M^2 + X_M^2$ في مقام الكسر، $\Re_{MR}$ في بسط الكسر، ومعامل التوجيهية Q تكون حدود تتغير مع التردد. يكون التغير في ضغط الصوت أو سرعة الحجاب نتيجة التغير في مقام الكسر تماما مثل تغير التيار الكهربي كدالة في تردد دائرة رنين RLC توالى. يسمى رسم هذا التغير كدالة في التردد المطبع (المسواه) يسمى منحنى الرنين العام.

عند الترددات المنخفضة، تتغير الكمية $\Re_{MR}$ مع مربع التردد. لهذا، إذا كانت Q ثابتة، فإن بسط الكسر في المعادلة 7ـ13 يتناسب طرديا مع التردد. إذا كانت Q غير ثابتة لكن تزداد مع التردد، فإن التغير يكون أكثر سرعة. بمعنى أخر، بإهمال التوجيهية (أى أن Q ثابتة)، فإن منحنى ضغط الصوت كدالة في التردد يكون له نفس الشكل تماما لمنحنى الرنين العام مضروبا في التردد.

عند التعبير عن المنحنى العام للرنين الكهربي بوحدات الديسيبل، أسفل تردد الرنين يكون للمنحنى ميل يساوى +6 ديسيبل لكل أوكتاف. فوق تردد الرنين يكون الميل ـ 6 ديسيبل لكل أوكتاف. في حالة ضغط –الصوت أو القدرة – الصوتية مقابل منحنى الترددـالاستجابة ، فإن الميول تزداد أكثر بشكل خطى مع التردد، بحيث عند التردد الأقل من تردد الرنين فإن الميل يكون +12 ديسيبل لكل أوكتاف وعند التردد الأعلى من تردد الرنين يكون الميل 0 ديسيبل (مستوى).

سواء تم اعتبار ضغط الصوت أو القدرة المشعة، فإن منحنى التردد – الاستجابة عندما يعبر عنه بوحدات الديسيبل فإنه يكون له نفس الشكل، بشرط أن يكون عامل التوجيهية ثابتا. الأن، سوف ندرس إحدى الكميات وهي القدرة المشعة كدالة في الكمية $f^2/(R_M^2 + X_M^2)$.

7ـ7 كفاءة أقصى قدرة متوفرة (PAE)

في أغلب الأحيان، يتم النص على استجابة السماعة بدلالة أقصى قدرة متاحة لها، والتي تكون 100 مرة قدر النسبة بين القدرة الصوتية المشعة إلى أقصى قدرة يمكن أن يعطيها المولد الكهربي. أقصى قدرة تكون متاحة من المولد الكهربي عندما تكون مقاومة الحمل مساوية

لمقاومة المولد.

$$W_E = \frac{e_g^{\ 2}}{4R_g} \qquad 7\text{-}14$$

الترددات المتوسطة والمنخفضة

تكون كفاءة أقصى قدرة متوفرة (PAE) عند الترددات المتوسطة والمنخفضة $[\omega^2 L^2 << (R_g + R_E)^2]$ عبارة عن المعادلة 7ـ6 مقسومة على أقصى قدرة متوفرة.

$$\text{PAE} = \frac{W}{W_E} \times 100 = \frac{800 B^2 l^2 R_g \Re_{MR}}{(R_g + R_E)^2 (R_M^{\ 2} + X_M^{\ 2})} \qquad 7\text{-}15 \text{سلطان}$$

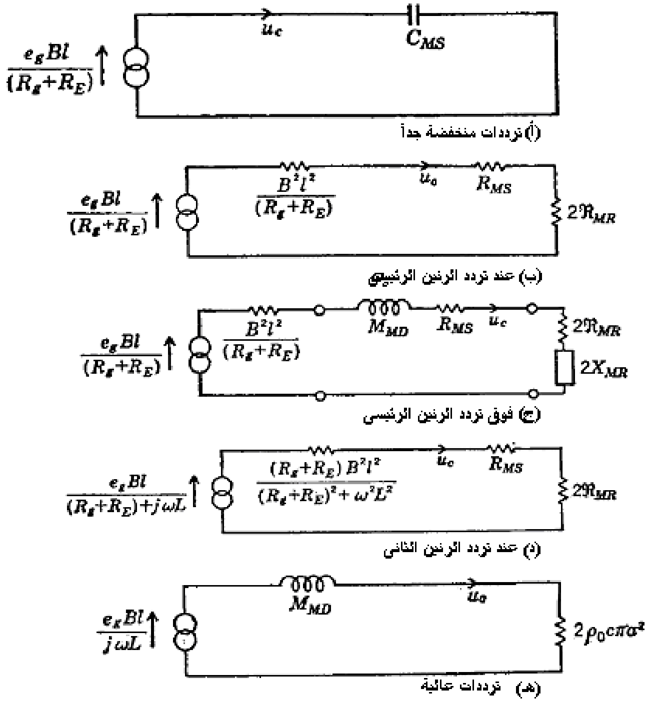
حيث R_M و X_M تعطى بالمعادلات 7ـ2 و7ـ3. عند الترددات المنخفضة يمكننا استبدال $\Re_{MR}$ بالمعادلة 7ـ9 و X_M بالمعادلة 7ـ4.

دعنا الأن نقسم منطقة التردد إلى خمسة أجزاء ونعالج كل جزء على حده عن طريق تبسيط الدائرة في الشكل 7ـ4أ إلى الدائرة المقابلة لهذا الجزء وحده. تم عمل مرجع للأشكال 7ـ5 و7ـ6 للانهيار.

في المنطقة A حيث تكون السماعة محكومة – بالجسوء، فإن قدرة الخرج تزداد مع الرتبة الرابعة للتردد أو 12 ديسيبل لكل أوكتاف.

في المنطقة B عند تردد الرنين ω_o ، فإن قدرة الخرج تتعين بالمقاومة الكلية في الدائرة X_M مرورا بالصفر.

في المنطقة C، أعلى من تردد الرنين الأولى، تصل قدرة الخرج (وضغط الصوت) إلى قيمة ثابتة، بشرط أن تقترب معاوقة الدائرة من كونها مفاعلة كتلة نقية. أى يمكن القول أن $\Re_{ME}$ تزداد مع مربع التردد، و $X_M^{\ 2}$ تزداد أيضا مع مربع التردد، وبالتالي فإن اختلاف التردد يتلاشى.



الشكل 7ـ5 أشكال مبسطة للدائرة المبينة في الشكل 7ـ4أ تصلح لمدى محدد من الترددات.

عند القيم الصغيرة لمقاومة المكبر R_g، تصبح المقاومة الميكانيكية الكلية R_M تصبح كبيرة نسبيا في بعض السماعات لدرجة أن الرنين يكون أكثر من أن يضمحل بشكل حرج. بالرجوع إلى المعادلة 7ـ8 التي تبين أن $R_M{}^2 >> X_M{}^2$، نجد أن ضغط الصوت يزداد خطيا مع التردد f. تم بيان هذه الحالة في الشكل 7ـ6 بواسطة الخط المتقطع.

الترددات العالية

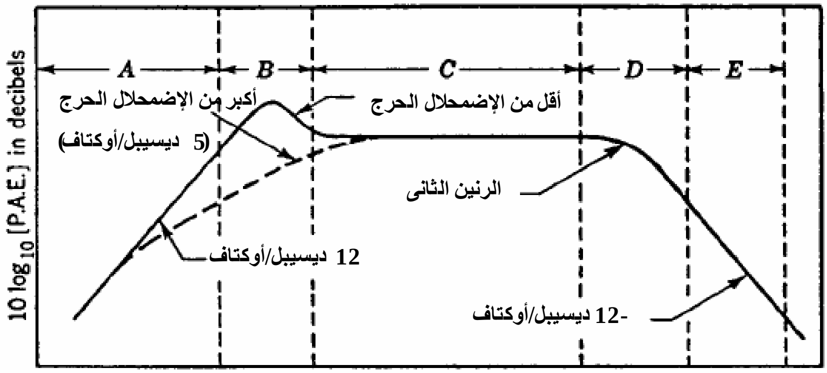
بالرجوع إلى الشكل 7ـ4أ، نرى أنه يوجد إمكانية لحدوث رنين ثاني يتضمن L/B^2l^2 والكتل $M_{MD}+X_{MR}/\omega$. يمكن تعيين سرعة ملف – الصوت عند هذا الرنين من الدائرة المبينة في الشكل 7.5د. سوف يحدث الرنين عندما،

$$\frac{\omega L(B^2l^2)}{\omega^2L^2+(R_g+R_E)^2}=\omega M_{MD}+2X_{MR} \qquad 7\text{-}16$$

ومع ذلك، يجب أن نلاحظ أنه إذا كانت $(R_g+R_E)^2$ كبيرة مقارنة مع $L^2\omega^2$، فإن محصلة

مفاعلة السعة L/B^2l^2 والمقاومة $B^2l^2/(R_g+R_E)$ على التوازي يصبح لها محاثة سالبة تساوى $-B^2l^2L/(R_g+R_E)^2$. في هذه الحالة، لا يمكن أن يحدث رنين.

ينطبق حل الشكل 7ـ5د على القمة الموجودة في المنطقة التي يرمز إليها بالرمز D في الشكل 7ـ6.



الشكل 7ـ6 منحنى كفاءة القدرة المتاحة بالديسيبل لسماعة صوتية افتراضية ذات مشعاع – مباشر في حاجز لانهائى. تم افتراض أن الحجاب الحاجز يعمل مثل مكبس صلب على كامل مدى التردد. القدرة تكون عبارة عن القدرة الكلية المشعة من كلا جانبى الحجاب. الصفر ديسيبل هو مستوى كفاءة القدرة المرجعية المتاحة. المنحنى المتصل يكون في حالة سماعة لها Q_T تكون 2 تقريبا. المنحنى المتقطع يكون في حالة سماعة لها Q_T تكون 0.5 تقريبا

عند الترددات الأعلى من تردد الرنين الثانى، فإن مقاومة الإشعاع على كل جانب من الحجاب تصبح مساوية تقريبا $\pi a^2\rho_o c$، حيث a نصف القطر الفعال للسماعة. أيضا، تصبح $\omega^2 M_{MD}$ كبيرة مقارنة مع المقاومة في الدائرة، و ω^2L^2 كبيرة مقارنة مع $(R_g+R_E)^2$. تتعين سرعة ملف – الصوت من الشكل 7ـ5 هـ. تكون كفاءة القدرة المتاحة على الصورة،

$$\text{PAE}=\frac{800R_gB^2l^2\rho_oc\pi a^2}{\omega^4L^2M_{MD}{}^2} \qquad \text{سلطان } 7\text{-}17$$

تم الإشارة إلى هذه المنطقة بالرمز E في الشكل 7ـ6. هنا، تتناقص قدرة الخرج بمعدل 12 ديسيبل لكل مضاعفة التردد (أى لكل أوكتاف).

يكون منحنى الاستجابة المعطى في الشكل 7ـ6 لسماعة نموذجية مستخدمة في إعادة إنتاج

موسيقى في المنزل. في هذا التطبيق، يتم جعل كتلة المخروط خفيفة بقدر الإمكان ومطاوعات التعليق عالية بقدر الإمكان بالتوافق مع الاستقرار الميكانيكى. في تطبيقات خاصة، يمكن أن تكون C_{MS} صغيرة لكي يكون تردد الرنين عاليا. أيضا، من الشائع عمليا جعل R_M كبيرة بحيث تكون السرعة u_c ثابتة تقريبا كدالة في التردد خلال المناطق B وC. في هذه الحالة، يزداد ضغط الصوت خطيا مع التردد، ولا تكون هناك منطقة مستوية C.

8.7 الكفاءة المرجعية

من المناسب تعريف الكفاءة المرجعية التي تسمح برسم شكل منحنى الاستجابة – التردد بدون بيان القدرة الصوتية الفعلية التي تشع عند الزمن. تعرف كفاءة القدرة المتاحة المرجعية (كلا الجانبين للحجاب) على النحو،

$$\mathrm{PAE}_{\mathrm{ref}} \equiv \frac{800 R_g B^2 l^2 \Re_{MR}}{(R_g + R_E)^2 \omega^2 (R_{MD} + 2M_{M1})^2} \qquad 7\text{-}18$$

أو بمساعدة المعادلة 7.9

$$\mathrm{PAE}_{\mathrm{ref}} \equiv \frac{800 R_g B^2 l^2 S_D{}^2 \rho_o}{2\pi c (R_g + R_E)^2 (R_{MD} + 2M_{M1})^2} \qquad 7\text{-}19$$

إذا كانت السماعة أقل من المضمحلة بشكل حرج، فإن المعادلة 7.19 تعطى الاستجابة الفعلية في منطقة التردد C، التي تقع فوق تردد الرنين الأول. حتى في حالة السماعات التي تضمحل بشكل كبير بحيث لا توجد المنطقة المستوية C، فإن المعادلة 7.19 تشكل مرجع ملائم يمكن مقارنة باقي المنحنى معه.

بالتعبير عنها كنسبة، فإن PAE التي تستجيب عند الترددات المتوسطة والمنخفضة حيث يكون الإشعاع غير موجه (أنظر الشكل 7.15) تكون على الصورة،

$$\frac{\mathrm{PAE}}{\mathrm{PAE}_{\mathrm{ref}}} = \frac{\omega^2 (M_{MD} + 2M_{M1})^2}{R_M{}^2 + X_M{}^2} \qquad 7\text{-}20$$

سلطان

عند تردد الرنين ω_o، حيث $X_M = 0$،

$$\frac{\mathrm{PAE}}{\mathrm{PAE}_{ref}} = \frac{\omega_0^2(M_{MD} + 2M_{M1})^2}{R_M^2} = Q_T^2$$

سلطان7-21

حيث Q_T تكون مناظرة لـ Q في الدوائر الكهربية. يمكن التعبير عن المعادلات 7ـ20 و7ـ21 بالديسيبل بأخذ اللوغاريتم للأساس 10 لكلا الطرفين في المعادلات.

في الباب الثامن من هذا الكتاب، الذي يدور حول أوعية السماعات الصوتية، تم تقديم مخططات التصميم التي يمكن منها تعيين (بدون حسابات مضنية) ضغط الصوت للسماعة ذات المشعاع – المباشر كدالة في التردد متضمنة المميزات التوجيهية. تم أيضا تقديم طرق تعيين ثوابت السماعات والصندوق وأوعية الانعكاس – المميز للتردد (bass-reflex). إذا كان القارئ مهتم فقط بتعلم كيف يختار حاجز للسماعة، يمكنه الذهاب مباشرة إلى الباب الثامن. تهتم الأجزاء التالية بالمعاملات التي تعين كامل الاستجابة وكفاءة السماعة في التصميم.

7ـ9 أمثلة لحسابات السماعة

المثال 7ـ1

بمعلومية كفاءة القدرة المتاحة المرجعية من المعادلة 7ـ19 لسماعة لها حاجز لا نهائى، عين ضغط الصوت المرجعى المكافئ لكفاءة القدرة المتاحة المرجعية بفرض أن معامل التوجيهية Q (لإشعاع جانب واحد) يساوى 2.

الحل

يرتبط ضغط الصوت عند مسافة r ، بفرض عدم توجيهية، بالقدرة الصوتية المشعة إلى جانب واحد (أنظر المعادلة 7ـ12) كما يلى،

$$p = \sqrt{\rho_o c I} = \sqrt{\frac{\rho_o c W_1}{2\pi r^2}}$$

حيث I الشدة عند المسافة r، $W_1 = W/2$ القدرة الصوتية الكلية المشعة من جانب واحد من الحجاب الحاجز.

ضغط الصوت المرجعى المكافئ يكون على الصورة،

$$p_{ref} = \sqrt{\frac{\rho_o c}{2\pi r^2}}\sqrt{\frac{\text{PAE}_{\text{ref}}}{200}W_E}$$

$$= \frac{e_g\ \rho_o BlS_D}{2\pi r(R_g + R_E)(M_{MD} + 2M_{M1})}$$

المثال 2.7

كمثال لكفاءة القدرة المتاحة الواجب توقعها من السماعة ذات المشعاع – المباشر التي لها تصميم مناسب ومثبتة في حاجز لا نهائي وتشع من كلا جانبي الحاجز، دعنا نحسب كفاءة القدرة المتاحة المرجعية (PAE_{ref}) من المعادلة 18.7 في حالة سماعة تجارية لها قطر معلن 12 بوصة. دعنا، أيضا، نحسب نسبة PAE إلى كفاءة القدرة المرجعية المتاحة عند تردد الرنين الأول. تكون قيم الثوابت النموذجية على النحو:

B = 10,000 gauss = 1.0 weber/m²
l = 9 m
$L = 7 \times 10^{-4}$ henry
R_E = 8 ohms
R_g = 2 ohms

a نصف القطر الفعال للحجاب 0.13 م، S_D المساحة الفعالة للحجاب تساوى 0.0531 م^2، كثافة الهواء $\rho_o = 1.18\ kg/m^3$، سرعة الصوت $c = 344.8\ m/\sec$، $\Re_{MR} = 1.57\omega^2 a^4 \rho_0/c$

$\Re_{MR} = 1.57\omega^2 a^4 \rho_0/c$ (see Table 5.1) $= 1.53 \times 10^{-6}\omega^2$ newton-sec/m
$M_{M1} = 2.67\rho_0 a^3$ (see Table 5.1) $= 0.00694$ kg
$M_{MD} = 0.011$ kg
$R_{MS} = 0.5$ mks mechanical ohm
$C_{MS} = 1.79 \times 10^{-4}$

الحل

من المعادلة 18.7 نحصل على

$$\text{PAE}_{\text{ref}} = \frac{800 \times 2 \times 1^2 \times 9^2 \times 1.53 \times 10^{-6}}{10^2 \times (0.025)^2} \approx 3.2\%$$

في حالة الإشعاع من جانب واحد فقط من السماعة نقسم هذا الرقم على 2.

فقط 1.6 ٪ من القدرة الكهربية المتاحة في المنطقة C من الشكل 6ـ7 تشع لجانب واحد من الحجاب. هذا يبين المقولة المقدمة في أول هذا الباب بأن كفاءة هذا النوع من السماعات تكون منخفضة في العادة.

يتعين تردد الرنين العلوى، إذا وجد، من المعادلة 16ـ7، أى ،

$$\omega^2 = \frac{1}{\left(M_{MD} + \dfrac{2X_{MR}}{\omega}\right)\left[\dfrac{L}{B^2l^2} + \dfrac{(R_g + R_E)^2}{\omega^2 LB^2l^2}\right]}$$

في حالة المثال الحالي، تكون $(R_E + R_g)^2$ كبيرة بالمقارنة مع $L^2\omega^2$ بحيث تعمل المقاومة والمكثف المتصلين على التوازى كمقاومة ومحاثة سالبة على التوالى، ولا يحدث رنين ثانى في مدى التردد الذي تعتبر له دائرة العنصر – المجمعة.

تحدث الحدود بين المناطق C وD في الشكل 5ـ7 عندما تقع قيمة ka بالتقريب بين 1 و2. بالنسبة للمثال الحالي، $ka = 1$ وهذا يقابل تردد

$$f = \frac{c}{2\pi a} = \frac{344.8}{2\pi \times 0.13} = 424 \text{ Hz}$$ سلطان

من الواضح، أن الحجاب الحاجز الأصغر ذو الوزن الأخف يولد المنطقة C تمتد إلى تردد أعلى. لكن، التخفيض في الكتلة M_{MD} المتسبب بالحجاب الحاجز الأصغر سوف يسبب زيادة في تردد الرنين الأول مع فقد ناتج في استجابة التمييز الترددى. العيب الإضافي للحجاب الأصغر هو أنه عند ضغط صوت ما، تكون السرعة الأكبر لملف – الصوت u_c مطلوبة. لهذا يجب تزويد السماعة بفجوة هواء أطول وتركيب مغناطيس أكبر.

يكون تردد الرنين الأول على الصورة،

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_M C_{MS}}}$$

حيث $M_M = M_{MD} + 2M_{M1} = 0.025 \text{ kg}$ ، بالتالي،

$$f_0 = \frac{100}{2\pi\sqrt{(0.025)(1.79)}} = 75 \text{ cps}$$
$$R_M = 81/10 + 0.5 + 0.3 \doteq 8.9 \text{ mks mechanical ohms}$$
$$Q_T = \frac{\omega_0 M_M}{R_M} = \frac{(471)(0.025)}{8.9} = 1.32$$

من المعادلة 7ـ21 نرى أن النسبة PAE عند ω_o إلى PAE المرجعية تكون مساوية Q_T^2 . بالتالي فإن هذه النسبة تساوى 1.74، و PAE عند ω_o تساوى 5.6٪ (كلا الجانبين).

الجزء الثامن عشر – عوامل التصميم التي تؤثر في أداء سماعة المشعاع – المباشر.

بشكل عام، يتم تصميم السماعات الصوتية لتعطى كفاءة تحويل للقدرة الكهربية إلى قدرة صوتية ولتؤثر في هذا التحويل بشكل موحد على مدى عريض من الترددات كلما أمكن. لتحقيق ذلك، يجب اختيار كل من ملف – الصوت، الحجاب الحاجز، والمكبر بشكل صحيح. هنا، سوف نناقش اختيار العناصر وتأثيرها على الكفاءة، التوجيهية، والاستجابة العابرة.

7ـ10 تصميم ملف – الصوت

بالتدقيق في الشكل 7ـ6 يتبين أن المنطقة C هي جزء مهم جدا من منحنى الاستجابة، لأن الكفاءة المتوسطة تكون محكومة بالاستجابة. من المعادلة 7ـ19، والتي تنطبق على هذه المنطقة، إذا كانت التقريبات المشار إليها قائمة، نرى أن كفاءة أقصى قدرة متاحة عند تردد ما تتناسب مع،

$$\text{PAE} \propto \frac{l^2 R_g}{[(R_g + R_E)(M_{MD} + 2M_{M1})]^2} \qquad 7\text{-}22$$

الأن، يمكن التعبير عن المقاومة R_E بدلالة كتلة لفات ملف – الصوت M_{MC} بكتابة،

$$R_E = \frac{\kappa l}{\pi a_w^2} \qquad 7\text{-}23$$

سلطان

حيث κ المقاومة النوعية لموصل ملف – الصوت بوحدات أوم.متر. في الجدول 7ـ1 تم تدوين قيم κ لمواد مختلفة. a_w نصف قطر السلك بالمتر، l طول لفات ملف – الصوت بالمتر.

أيضا

$$M_{MC} = \pi a_w^{\,2} l \rho_w \qquad 7\text{-}24$$

حيث ρ_ω كثافة سلك ملف الصوت بالكيلوجرام للمتر المكعب (أنظر الجدول 1ـ7). من المعادلات 23ـ7 و24ـ7 نحصل على

$$R_E = \frac{\kappa l^2 \rho_w}{M_{MC}} \qquad 7\text{-}25$$

سلطان

الجدول 1ـ7 المقاومة النوعية وكثافة معادن مختلفة

Metal element	Resistivity, ohm-m	Density, kg/m³
Aluminum	0.0283×10^{-6}	2.70×10^{3}
Antimony	0.417	6.6
Bismuth	1.190	9.8
Cadmium	0.075	8.7
Calcium	0.046	1.54
Carbon	8.0	2.25
Cesium	0.22	1.9
Chromium	0.026	6.92
Cobalt	0.097	8.71
Copper	0.0172	8.7
Gold	0.0244	19.3
Iridium	0.061	22.4
Iron	0.1	7.9
Lead	0.220	11.0
Lithium	0.094	0.534
Magnesium	0.046	1.74
Manganese	0.050	7.42
Mercury	0.958	13.5
Molybdenum	0.057	10.2
Nickel	0.078	8.8
Platinum	0.10	21.4
Potassium	0.071	0.87
Silver	0.0163	10.5
Sodium	0.046	0.97
Tin	0.115	7.3
Titanium	0.032	4.5
Tungsten	0.055	19.0
Zinc	0.059	7.1

بالتعويض بالمعادلة 24ـ7 في المعادلة 22ـ7 نحصل على،

$$\mathrm{PAE} \propto \frac{l^2 R_g}{\left[\left(R_g + \dfrac{\kappa l^2 \rho_w}{M_{MC}}\right)(M_{MC} + M'_{MD} + 2M_{M1})\right]^2} \qquad 7\text{-}26$$

سلطان

حيث $M'_{MD} = M_{MD} - M_{MC}$.

بتفاضل هذه المعادلة بالنسبة لـ M_{MC} ومساواة الناتج بالصفر يعطى قيمة M_{MC} اللازمة لخرج أقصى قدرة من المولد الذي له معاوقة R_g بشرط أن نفترض أن طول الملف يكون مقدر من قبل. بالتالي، يمكن إيجاد M_{MC} لأقصى PAE من العلاقة،

$$M_{MC}^2 = \frac{\kappa l^2 \rho_w}{R_g}(M'_{MD} + 2M_{M1})$$ سلطان 7-27

أكثر من ذلك، بالتعويض من المعادلة 7ـ25 في المعادلة 7ـ27 نحصل على،

$$M_{MC} = \frac{R_E}{R_g}(M'_{MD} + 2M_{M1})$$ سلطان 7-28

كإمكانية بديلة، نفترض أن مقاومة الملف R_E تكون ثابتة. دع M_{MC} و l يتغيران، ثم عين M_{MC} لأقصى PAE.

من المعادلة 7ـ25 نحصل على،

$$l^2 = \frac{R_E M_{MC}}{\kappa \rho_w}$$ 7-29

بوضع هذا في المعادلة 7ـ22 نحصل على،

$$\text{PAE} \propto \frac{R_E R_g M_{MC}}{(R_g + R_E)^2 (M_{MC} + M'_{MD} + 2M_{M1})^2}$$ 7-30

حيث، كما سبق $M'_{MD} = M_{MD} - M_{MC}$. بفرض أن PAE قيمة عظمى نحصل على،

$$M_{MC} = M'_{MD} + 2M_{M1}$$ 7-31

أخيرا، دعنا نفترض أن M_{MC} في المعادلة 7ـ30 ثابتة وأننا نرغب في ترك R_E و l يتغيران. حينئذ عين R_E لأقصى PAE. بجعل المعادلة 7ـ30 قيمة عظمى نحصل على،

$$R_E = R_g$$ سلطان 7-32

بالتالي، في حالة القيمة المضبوطة لكفاءة القدرة المتاحة، نرى من المعادلات 7ـ28، 7ـ31، و7ـ32

أن $R_E = R_o$ و $M_{MC} = M'_{MD} + 2M_{M1}$.

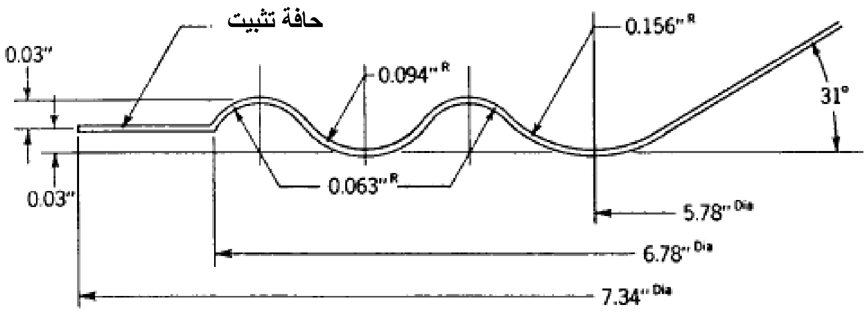
لكن، ليس من المعتاد أن يكون ملف الصوت بهذه الكتلة الكبيرة، لأن ملف الصوت الكبير يتطلب في المقابل تركيب مغناطيس كبير.

تم تدوين قيم مقاومات وكتل ملف – الصوت لسماعات نموذجية أمريكية في الجدول 8ـ1 في الباب المقبل.

11ـ7 سلوك الحجاب الحاجز

لا تصلح النظرية البسيطة باستخدام طريقة الدوائر المكافئة، والتي استنتجناها من قبل، فوق بعض الترددات بين 300 و1000 هيرتز. في مدى التردد الأعلى فإن المخروط لن يتحرك كوحدة واحدة، وتتغير كتلة الحجاب M_{MD} وأيضا معاوقة الإشعاع. هذه التغيرات قد تحدث بسرعة عظيمة كدالة في التردد. يترتب على ذلك، أنه لا تتوفر أى معالجة رياضية سلسة التي يمكن فيها توقع الأداء المضبوط للسماعة في مدى التردد الأعلى.

نقدم هنا دراسة مفصلة عن سماعة خاصة كمثال على سلوك مخروط من الورق المقوى (الملبد)، له قطر فعال 6.7 بوصة (أنظر الشكل 7ـ7)، له زاوية متضمنة مقدارها 180 درجة.

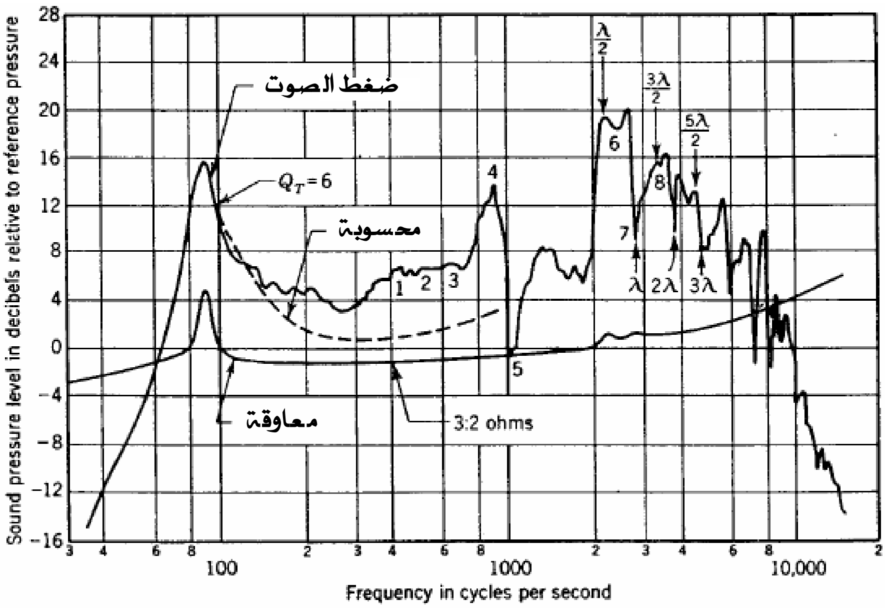


الشكل 7ـ7 تفاصيل حافة مخروط سماعة صفحة ورق ـ مقوى في سماعة 8 بوصة.[2]

يبين الشكل 7ـ8 منحنى استجابة مستوى – ضغط – الصوت لهذه السماعة الصوتية مقاسة عند المحور الرئيسي. لهذه السماعة الخاصة، بالإضافة إلى رنينها الرئيسي، تمت الإشارة في الشكل إلى القمم والمنخفضات في الاستجابة عند النقط 1 إلى 8.

الرنين السائد عند 90 هيرتز هو الرنين الرئيسي وله سعة نسبية تعطى بالمعادلة 7ـ21. أعلى من ذلك توجد منطقة مستوية جدا أطلقنا عليها أسم المنطقة C.

عند النقطة 1، والتي تقع عند 420 هيرتز، يتداعى إلى رنين من الشكل المبين بالمخطط الأول في الشكل 7ـ9. هنا، توجد أربعة خطوط معقودة على المخروط ممتدة قطريا، وأربعة مناطق لأقصى حركة. كما يتبين بالإشارات الموجبة والسالبة، تتحرك منطقتان نحو الخارج بينما تتحرك منطقتان نحو الداخل. تكون محصلة التأثير هي ضخ الهواء إلى الأمام وإلى الخلف عبر الخطوط العقدية. يهتز المخروط أيضا ككل جيئة وذهابا عمودى على مستوى الصفحة. تكون محصلة التغير في الخرج 5 ديسيبل تقريبا نسبة إلى الخرج المحسوب. توجد حالة مماثلة عند النقطة 2 عند 500 هيرتز، ماعدا أن عدد الخطوط العقدية يزداد من 4 إلى 6. عند النقطة 3، 650 هيرتز، يصبح الاهتزاز أكثر تعقيدا. لم تعد الخطوط العقدية واضحة المعالم والسماعة تتذبذب بطريقة بحيث أن الزيادة في مستوى الضغط تكون 4.5 ديسيبل تقريبا باستثناء 0.5 ديسيبل زيادة بسبب التوجيهية.



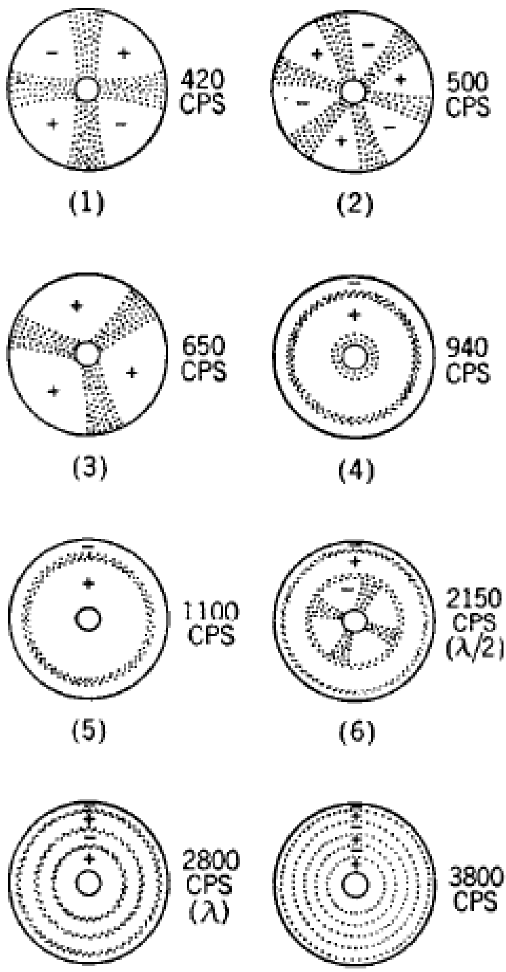
الشكل 7ـ8 الاستجابة النسبية للقدرة – المتاحة لسماعة قطرها 8 بوصة مثبتة في حاجز لانهائى.
الخطوط المتقطعة تمثل الحسابات من الأشكال 8ـ12 و8ـ13 عند $Q_T = 6$ [2].

بالنسبة للنقطة 4 عند 940 هيرتز، يصبح نوع جديد من الاهتزاز أكثر وضوحا. يتحرك الحجاب في كل مكان في نفس الطور ماعدا عند الحافة. عند النظر إلى تركيب الحافة المبين في الشكل 7ـ7 وإلى نموذج الاهتزاز في الشكل 7ـ9(4)، يمكننا أن نستنتج ما يحدث. يهتز الجزء المركزى من المخروط بسعة صغيرة جدا، بينما يكون للجزء الرئيسى من المخروط سعة أكبر. عند 8.78 بوصة يكون قطر سعة الاهتزاز صغيرا جدا. عند هذه النقطة يكون للتموج نصف قطر أكبر (0.156 بوصة). ومع حركة المخروط مقتربا ومبتعدا فإن الورقة تميل إلى الطي حول هذا المنحنى، وهذا يثير تموج الـ 0.094 بوصة الذي يستمر نحو تذبذب عنيف عند تردد رنينه. تردد الحافة يكون 180 درجة خارج الطور مع الجزء الرئيسى من المخروط. لكن، الجزء الرئيسى من المخروط له سعة عالية نتجت بواسطة حركة الهز (التقويض) بالقرب من القطر 5.78 بوصة، وبسبب مساحته الأكبر، فإن جزء فقط من تأثيره في توليد مستوى صوت عالى يتلاشى بواسطة حركة الحافة. النتيجة المحصلة تكون عبارة عن قمة في الخرج (أنظر النقطة 4 الشكل 7ـ8).

عند النقطة 5، 1100 هيرتز، يلاحظ تناقص حاد في الاستجابة. يبدو أن التناقص ناتج عن حركة الخط العقدى نحو قمة المخروط، وتناقص في سعة الجزء (+). هنا، يكون التأثير هو ضخ الهواء إلى الخلف وإلى الأمام عبر الخط العقدى، مع تلاشى الخرج. إن هذا الاهتزاز يكون مميزا جدا عند وقت حدوث تلك الحركة، وتهبط الاستجابة بشدة.

مع زيادة التردد، تتحول السماعة أنماط مميزة لم تزال مختلفة للاهتزاز. كما هو مبين في الشكل 7ـ9، الحالة 6، تظهر عدة خطوط عقدية مركزية مع حافة السماعة. عندما يحدث هذا،

يتم الحصول على زيادة كبيرة في الخرج، كما هو مبين بالنقطة 6 في الشكل 7ـ8. مع زيادة التردد، تحدث حالات أخرى مثل هذه الحالات من الرنين، مع وضوحا أكبر للخطوط العقدية. هذه الخطوط العقدية تكون ناتجة عن الموجات المنقولة خارجة من ملف الصوت إلى حافة المخروط وتلك المنعكسة العائدة مرة أخرى. هذه الموجات المتحركة نحو الخارج و نحو الداخل تتحد لتوليد نماذج موجات موقوفة التي سوف تشع أقصى قدرة عند بعض الزوايا المعينة مع المحور الرئيسي للسماعة.



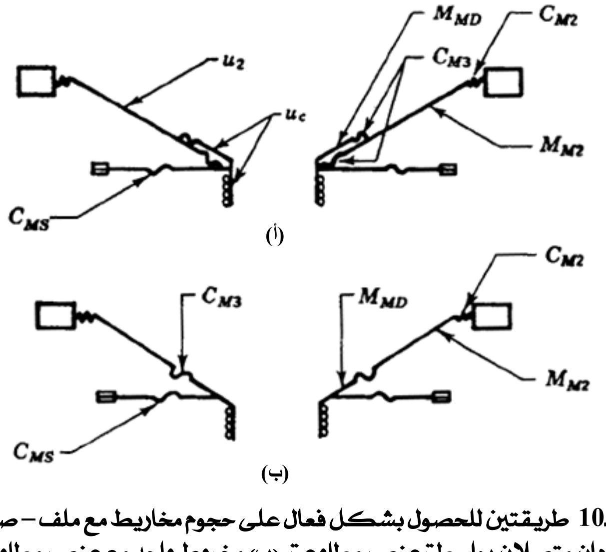
الشكل 7-9 نموذج عقدى لمخروط السماعة التي لها منحنى الاستجابة المبين في الشكل 7-8. تبين الخطوط المظللة والمتقطعة سعة اهتزاز صغيرة. تشير الإشارات (+) و(-) إلى مناطق تتحرك في اتجاه ات متعاكسة، أى في طور معاكس [2] .

لتقليل نماذج الموجة – الموقوفة من النوع المبين في الحالات 6، 7، و8 في الشكل 7-9، يكون من الضروري وضع معاوقة إنهاء ميكانيكية مناسبة على الحافة الخارجية للحجاب الحاجز. هذا الإنهاء يجب أن يكون من النوع الذي يمتص الموجات المنتقلة للخارج من مركز المخروط حتى لا توجد موجات تنعكس عائدة. في التصميم العملى، كثيرا ما يتم استخدام حافة تثبيت من الجلد. هذا الجلد يجب أن يكون جلد غنم ناعم جدا، له وزن تقريبى 3 أونصات/ياردة مربعة، ومثبت بعناية. تكون حافة التثبيت الجلدى فعالة أيضا في تخفيض رنين الحافة (الإطار). يكون التأثير

الناتج هو تولد استجابة أكثر انتظام في مدى التردد بين 700 و1500 هيرتز في الشكل 7ـ8.

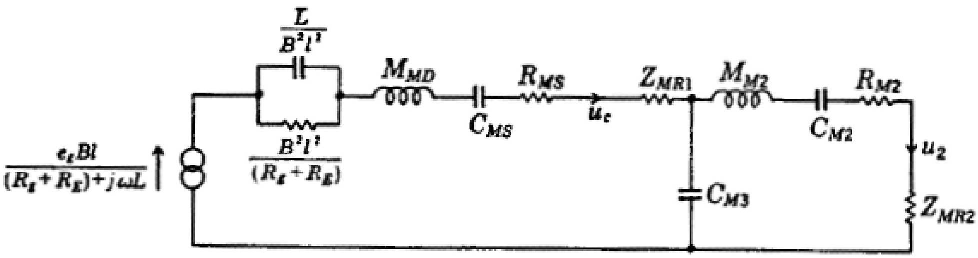
12ـ7 وحدة دفع البوق ـ المقسم

لقد رأينا أن العوائق المهمة للاستجابة المستوية عند الترددات العالية هي كبر نصف قطر وكتلة الحجاب الحاجز. لهذا، فإن الوسائل المنطقية لتحسين استجابة التردد – العالى ستكون تصميم حجاب حاجز بحيث يتحرك منه فقط الجزء القريب من ملف الصوت عند الترددات العالية. يبين الشكل 7ـ10 وسيلتين لعمل هذا. تم بيان أداء هذه الأحجبة الحاجزة بالدائرة المكافئة في الشكل 7ـ11. هنا، الكميات M_{MD}، C_{MS}، و R_{MS} هي الثوابت الميكانيكية للمخروط الأصغر (الداخلي)، و M_{M2}، C_{M2}، وR_{M2} هي الثوابت الميكانيكية للمخروط الخارجي. يتصل المخروطين مع بعضهما البعض بطريقة ميكانيكية خلال مطاوعة C_{M3}. المعاوقة الإشعاعية للمخروط الداخلي Z_{MR1}، وللمخروط الخارجي هي Z_{MR2}. تكون الثوابت الأخرى كما هي في الشكل 7ـ4. عند الترددات العالية تكون $1/\omega C_{M3}$ في الأساس دائرة قصر، وتؤخذ فقط ثوابت المخروط الأصغر في الاعتبار. عمليا، يتم استخدم التصميم المبين في الشكل 7ـ10ب بصورة شائعة بسبب رخص تكلفته.



الشكل 7ـ10 طريقتين للحصول بشكل فعال على حجوم مخاريط مع ملف – صوت واحد. (أ) مخروطان منفردان متصلان بواسطة عنصر مطاوعة. (ب) مخروط واحد مع عنصر مطاوعة مصبوب فيه عند كسر من نصف قطره.

الوسائل الأخرى لكن أغلى كلفة لفصل الجزء الداخلي من المخروط عن الخارجي هي استخدام شريط جلدي للمطاوعة C_{M3} . المادة التي تستخدم أحيانا لهذا الغرض هي جلد الماعز، الذي له وزن 2.5 أونصة/الياردة المربعة. عند الترددات العالية التي عندها يعمل المخروط الداخلي للسماعة، يعمل جلد الماعز على امتصاص الموجات المنتقلة في المخروط إلى الخارج من ملف الصوت. بذلك يتم الحصول على منحنى استجابة أكثر نعومة.

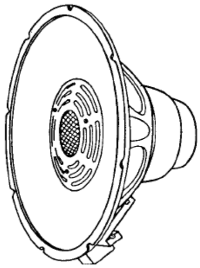


الشكل 11.7 دائرة ميكانوصوتية لسماعات بها المخاريط المبينة في الشكل 10.7.

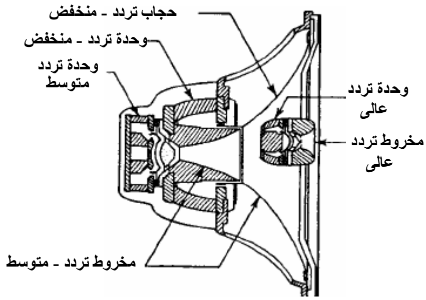
13.7 وحدات دفع متعددة

طرق أخرى لتحقيق التكافؤ للحجوم العديدة للمخاريط هي تثبيت سماعتين أو أكثر بأقطار مختلفة بالقرب من بعضهم البعض. تستخدم شبكة كهربية تسمى شبكة اختبار الذبذبة (crossover network) أو شبكة العبور لمد القدرة الكهربية لسماعة واحدة بترددات منخفضة وللسماعة أو السماعات الأخرى بترددات أعلى. إن صعوبة هذا الترتيب هي عندما يتم تثبيت السماعات جنبا إلى جنب، فإن المسار الذي يسلكه الصوت من كل سماعة حتى المستمع سوف يكون مختلفا عند الأماكن المختلفة في غرفة الاستماع. لذلك، على مقربة من ترددات العبور يحدث إلغاء للصوت في بعض أجزاء الغرفة، وتحدث إضافة عند الأجزاء الاخرى.

لتفادى هذا التأثير، في أغلب الأحيان يتم تثبيت السماعات متحدة المركز، بمعنى أن السماعات الأصغر توضع على محور السماعات الأكبر في المقدمة. (أنظر الأشكال 12.7 و13.7). بالقرب من تردد العبور يوجد في العادة بعض الحماية من الإشعاع من السماعات الأكبر بواسطة الأصغر، مع عدم انتظام ناتج في منحنى الاستجابة.



الشكل 12.7 سماعة محورية أو "طريقين"



الشكل 13.7 مقطع عرضى في سماعة ثلاثية المحور أو (ثلاثة طرق). (مجاملة مشتركة Jensen Mfg شيكاغو، إيلينوى)

14.7 مميزات (سمات) التوجيهية

يبين منحنى الاستجابة في الشكل 6.7 والمعلومات المقدمة في الفقرات الثلاثة السابقة أنه أعلى من التردد الذي عنده $ka = 2$ (عادة بين 800 إلى 2000 هيرتز) يمكن توقع أن سماعة المشعاع – المباشر تشع قدرة متناقصة. يكون المعدل الذي عنده تتناقص القدرة المشعة، إذا كان البوق (المخروط) عبارة عن مكبس صلب، بين 6 و12 ديسيبل لكل أوكتاف. لا يكون هذا التناقص في قدرة الخرج الظاهر مباشرة في جبهة السماعة مثل تلك التي تكون في الجوانب بسبب التوجيهية. يمكن القول، أنه عند الترددات العالية، أن المخروط يوجه جزء أكبر من القدرة على امتداد المحور منه في الاتجاهات الأخرى. أيضا، يتم التغلب على التناقص في القدرة بشكل جزئى بواسطة حالات الرنين التي تحدث في الحجاب الحاجز، كما رأينا من الشكل 8.7.

نماذج التوجيهية لسماعات نموذجية

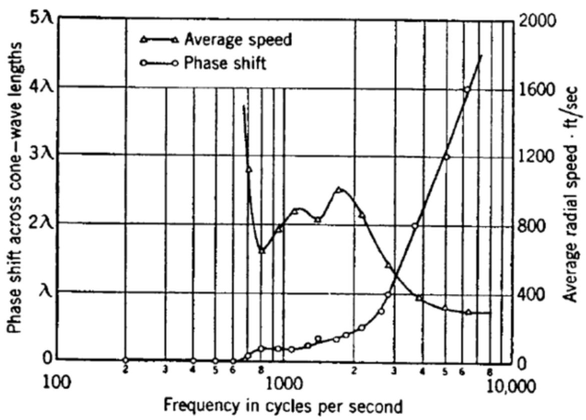
يبين الشكل 23.4 نماذج التوجيهية نموذجية لسماعات بقطر 12 بوصة ذات مشعاع – مباشر،

ومثبتة في أحد الجانبين الكبيرين لصندوق مغلق له أبعاد 27 في 20 في 12 بوصة. تكون هذه البيانات صحيحة بشكل تقريبي للسماعات ذات الأقطار الأخرى إذا تم ضرب الترددات الموجودة تحت الرسوم البيانية في النسبة بين 12 بوصة وقطر السماعة بالبوصة.

بمقارنة مع نماذج التوجيهية لمكبس صلب مستوى في نهاية أنبوبة طويلة، كما هو مبين في الشكل 4ـ12، يتضح أن نماذج التوجيهية للمكبس المستوى تكون مختلفة عنها في حالة السماعة الصوتية الحقيقية. ينتج هذا الفرق من زاوية المخروط، سرعة انتشار الصوت في المخروط نسبة إلى سرعته في الهواء، وحالات الرنين في المخروط. في هذا الصدد، من الشيق أن نرى كيف تتغير السرعة مع التردد في مخروط حقيقي.

سرعة انتشار الصوت في مخروط

دعنا نعرف السرعة المتوسطة لانتشار الصوت في المخروط عندما: تقسم المسافة بين قمة المخروط حتى الحافة على عدد الأطوال الموجية في هذه المسافة، مضروبة في التردد بالهيرتز. في حالة السماعة الخاصة 8ـبوصة المبينة في الأشكال 7ـ7 إلى 7ـ9، تعطى إزاحة الطور ومتوسط سرعة انتشار موجة الصوت من قمة المخروط إلى الحافة في الشكل 7ـ14. عند الترددات المنخفضة يتحرك المخروط في طور واحد بالتالي يمكن اعتبار السرعة ما لانهاية. عند الترددات العالية تقترب السرعة بشكل تقاربي من السرعة في صفحة مستوية من نفس المادة ولها حجم لا نهائي.



الشكل 7ـ14 إزاحة الطور ومتوسطة سرعة الموجة في بوق سماعة 8 بوصة.[2]

مستوى الشدة على محور معين

لقد ذكرنا أنه عند الترددات العالية يصبح الحجاب الحاجز موجها. لكي نحسب التحسن في ضغط الصوت على محور السماعة مقارنة مع ضغط الصوت المبين بواسطة معادلات كفاءة أقصى قدرة متاحة، فإنه من المناسب استخدام مبادئ معامل التوجيهية ودليل التوجيهية كما هو معرف في الجزء الحادي عشر. على سبيل المثال، ربما نرغب في معرفة شدة (أو منسوب ضغط الصوت) على محور السماعة، بمعلومية استجابة القدرة – المتاحة وعامل التوجيهية. يتم هذا كالتالي:

الشدة كدالة في التردد على محور تماثل السماعة مقسومة على القدرة الكهربية المتاحة تساوي حاصل ضرب (1) مميزة استجابة كفاءة – القدرة –المتاحة، (2) عامل التوجيهية، و(3) $1/4\pi r^2$ ، حيث r المسافة التي عندها يتم قياس الشدة. بوحدات الديسيبل، نحصل على،

$$10 \log_{10} \frac{I_{ax}}{W_E} = 10 \log_{10} \text{PAE}_1 + \text{DI} - 10 \log_{10} 4\pi r^2 \qquad 7\text{-}33$$

حيث $I_{ax} = p_{ax}{}^2 / \rho_o c$ الشدة بالواط لكل متر مربع على محور معين عند تردد ما، p_{ax} منسوب ضغط الصوت بالنيوتن لكل متر مربع مقاس على المحور المعين عند تردد ما، $\text{PAE}_1 = W_1 / W_E$ نسبة قدرة الصوت الكلية بالواط المشعة بواسطة الجانب الأمامي للسماعة إلى أقصى قدرة كهربية (بالوات) متاحة من المصدر (أنظر المعادلة 7ـ14)، وحيث DI تعطى بالمعادلة 4ـ19 والشكل 4ـ20. لاحظ أنه، بالنسبة للمكبس في حاجز لانهائى، فإن DI عند الترددات المنخفضة تكون 3 ديسيبل لأن القدرة المشعة إلى نصف كرة، وتلك التي هي الحد الأخير من المعادلة 7ـ32 تكون مساحة الكرة، بالديسيبل.

عند التعبير عن منسوب ضغط الصوت على محور معين (وضغط مرجعي 0.0002 ميكروبار = 0.00002 نيوتن/م^2)، فإن المعادلة 7ـ33 تصبح على الصورة،

$$\begin{aligned}\text{SPL } re \text{ 0.0002 microbar} &= 20 \log_{10} \frac{p_{ax}}{0.00002} = 10 \log_{10} W_E \\ &+ 10 \log_{10} \text{PAE}_1 + \text{DI} - 10 \log_{10} 4\pi r^2 \\ &+ 10 \log_{10} \rho_0 c + 94 \text{ db} \qquad 7\text{-}34\end{aligned}$$

15.7 الاستجابة العابرة

يجب أن يستند تصميم وعاء السماعة واختيار معاوقة المكبر في النهاية على الحكم الشخصي على ما يشكل "الجودة" أو ربما ببساطة على "رضاء" الاستماع. يعتقد الكثير من المشاهدين أن استجابة منسوب – ضغط – الصوت المستوية على امتداد على الأقل مدى التردد بين 70 و7000 هيرتز وجد أنها تكون مرغوبة من قبل أكثر المستمعين. بعض المشاهدين يعتقدون أن الاستجابة يجب أن تكون مستوية تحت 1000 هيرتز لكن الاستجابة بين 1000 و4000 هيرتز يجب أن تكون 5 ديسيبل أعلى من قيمتها تحت الـ 1000 هيرتز. فوق 4000 هيرتز، يجب أن تعود الاستجابة إلى قيمتها عند التردد المنخفض. يعتقد أيضا بعض المشاهدين أن تلك السماعات التي تصوت أفضل عموما تعيد إنتاج تفجر النغمات بشكل جيد، ومع ذلك فأن هذا المطلب مثبت بشكل أفضل في المراجع في حالة الترددات العالية منه في حالة الترددات المنخفضة. (انفجار النغمة هو نبضة قطار – موجة تحتوي على عدد من الموجات ذات تردد معين).

إن العامل المهم الذي يعين الاستجابة العابرة للدوائر المبينة في الشكل 4.7 هو كمية تخميد حجاب السماعة الحاجز الموجود. بالنسبة لسماعة معطاة، يمكن أن يتغير التخميد (1) بواسطة اختيار معاوقة المكبر R_g أو (2) بواسطة ضبط المركبة المقامية لمعاوقة وعاء السماعة، أو (3) بواسطة كليهما. بشكل عام، يتم ضبط التخميد بواسطة اختيار معاوقة المكبر لأنها الأسهل في التنفيذ.

تكون السرعة اللحظية u_c لكل من الحالة الثابتة وحالة التطبيق المفاجئ للموجات الجيبية على الصورة،

$$u_c = \frac{e_g Bl}{(R_g + R_E)|Z_M|} \left[\sin(\omega t - \theta) + \frac{\sin\theta}{\sin\psi_0} e^{-R_M t/2M_M} \sin(\omega_0 t + \psi_0) \right] \quad 7\text{-}35$$

حيث

$$Z_M = |Z_M|e^{j\theta} = R_M + jX_M \qquad \text{سلطان}7\text{-}36$$

حيث R_M و X_M تعطى بالمعادلات 7ـ2 و7ـ4.

$$\sin\psi_0 = \frac{1}{\sqrt{1-\left[\frac{(R_M{}^2/4M_M{}^2)+\omega_0{}^2}{\omega\omega_0}\frac{R_M}{X_M}+\frac{R_M}{2M_M\omega_0}\right]^2}} \qquad \text{سلطان}7\text{-}37$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{M_M C_{MS}} - \frac{R_M{}^2}{4M_M{}^2}} = 2\pi \text{ times the resonance frequency} \qquad \text{سلطان}7\text{-}38$$

من المعادلة 7ـ1 نرى أن الكسر الأول من الجانب الأيمن من المعادلة 7ـ35 والحد الأول بين الأقواس يكون هو حد الحالة – الثابتة. الحد الثانى بين الأقواس يكون الحد العابر، والذي يتلاشى بمعدل $\exp(-R_M t/2M_M)$. من المعروف أن زمن انعكاس الصوت في حجرة الجلوس المتوسطة يكون في حدود 0.5 ثانية، وهذا يقابل ثابت اضمحلال مقداره 13.8 ث$^{-1}$.

بينت الدراسات النفسية أيضا أنه إذا تناقص الصوت العابر في حجرة إلى أقل من 0.1 من قيمته الابتدائية خلال 0.1 من الثانية، فإن معظم المستمعين لا ينزعجون " بتدلى " الصوت. هذا يقابل ثابت اضمحلال مقداره 23 ث$^{-1}$، والذي يكون أكثر سرعة اضمحلال من الذي يحدث في غرفة الجلوس المتوسطة.

بالرغم من أن المعايير المقبولة للتشويه العابر لم يؤسس للسماعات، يبدو من المعقول افتراض أنه إذا كان ثابت الاضمحلال للسماعة أكبر من أربع أمثال هذه الكمية، بمعنى، أكبر من 92 ث$^{-1}$، فإنه لا يوجد اعتراض جدي من أكثر المستمعين على الحدوث العابر مع تفجر نغمة. وفقا لذلك، فإن المعيار المقترح هنا كتمثيل مقنع للأداء العابر يكون،

$$\frac{R_M}{2M_M} > 92 \text{ sec}^{-1} \qquad 7\text{-}39$$

تبين المعادلة 7ـ35 أنه، كلما كانت الكمية $R_M/2M_M$ أكبر فإن العابر يكون أقصر. يجب تفسير المعادلة 7ـ39 كوضع حدود سفلية على كمية الاضمحلال (التخميد) الذي يجب أن يدخل إلى النظام. تكون كمية التخميد التي يجب إدخالها بعد هذه الكمية الدنيا غير

معروفة. في الباب التالى، سوف نناقش العلاقة بين معيار المعادلة 7ـ39 ومنحنى الاستجابة مع حاجز.

يكون كل رنين حجاب حاجز (أى، النقط 1 إلى 8 في الشكل 7ـ8) مصحوبا بزمن اضمحلال عابر يتعين من معادلة تشبه المعادلة 7ـ35. لتحقيق معيار المعادلة 7ـ39، في العادة يكون من الضرورى تخميد مخروط السماعة وإنهاء الحواف حتى يتم الحصول على منحنى استجابة يكون أكثر نعومة من المنحنى المبين في الشكل 7ـ8. مع سماعات المشعاع – المباشر الجيدة جدا يتم الحصول على منحنيات استجابة أنعم بكثير. الخطوات الهندسية والتحكم في الإنتاج الضرورى لتحقيق تشوه عابر منخفض ومنحنى استجابة عابرة يؤدى إلى التكلفة العالية للسماعة المكتملة.

المثال 7ـ3

إذا كان للفجوة الدائرية في المغناطيس الدائم طول قطرى 0.2 سم، محيط مقداره 8 سم، وطول محورى مقداره 1.0 سم، عين الطاقة المختزنة في فجوة الهواء إذا كانت كثافة الفيض تساوى 10000 جاوس؟

الحل

$$\text{Volume of air gap} = (0.002)(008)(0.01) = 1.6\times10^{-6}\ \text{m}^3$$

$$\text{Flux density} = 1\ \ \text{weber/m}^2$$

من كتب الأجهزة المغناطيسية، نجد أن الطاقة المختزنة تكون،

$$W = \frac{B^2 V}{2\mu}$$

حيث النفاذية μ للهواء هي $\mu_o = 4\pi\times10^{-7}\ \text{weber/(amp - turn m)}$. بالتالي، فإن طاقة فجوة – الهواء تكون

$$W = \frac{(1)(1.6\times10^{-6})}{(2)(2\pi\times10^{-7})} = \frac{2}{\pi} = 0.636\ \text{joule}$$

المثال 4.7

سماعة – 12 بوصة مثبتة في أحد الجانبين الكبيرين لصندوق مغلق له أبعاد 27 في 20 في 12 بوصة. عين وارسم كفاءة أقصى قدرة متاحة ومستوى ضغط الصوت النسبى على المحور الرئيسى.

الحل

نماذج التوجيهية النموذجية لهذه السماعة مبينة في الشكل 4ـ23. كما تم بيان دليل التوجيهية على المحور الرئيسى كدالة في التردد في الشكل 4ـ24. من الشيق ملاحظة أن تردد التحول (العبور) من التوجيهية المنخفضة إلى التوجيهية العالية يكون 500 هيرتز تقريبا. بما أن نصف القطر الفعال للمخروط المشع لهذه السماعة يكون حوالي 0.13 م، فإن ka عند تردد التحول هذا يكون،

$$ka = \frac{2\pi fa}{c} = \frac{1000\pi \times 0.13}{344.8} = 1.18$$

أو واحد تقريبا، كما يتوقع من دراستنا السابقة. التحول من المنطقة C (حيث افترضنا أن $\omega^2 M_{M1}^2 \gg \Re_{MR}^2$ و $\omega^2 L^2 \ll (R_g + R_E)^2$) إلى المنطقة E في الشكل 7ـ6 تحدث أيضا عند $ka = 1$ تقريبا.

في مدى التردد بين $ka = 0.5$ و $ka = 3$، يمكن تمثيل السماعة بالدائرة المبينة في الشكل 7ـ4أ. دعنا نفترض أن السماعة مثبتة في حاجز لا نهائى وأن نصف القدرة تشع إلى كل جانب. أيضا، دعنا نفترض أن معاوقة المكبر تكون منخفضة جدا.

تكون كفاءة القدرة المتاحة، من جانب واحد للسماعة على الصورة،

$$\text{PAE}_1 = \frac{W_1}{W_E} = \frac{400 B^2 l^2 R_g \Re_{MR}}{(R_g + R_E)^2 (R_{MT}^2 + X_{MT}^2)} \qquad 7\text{-}40$$

حيث

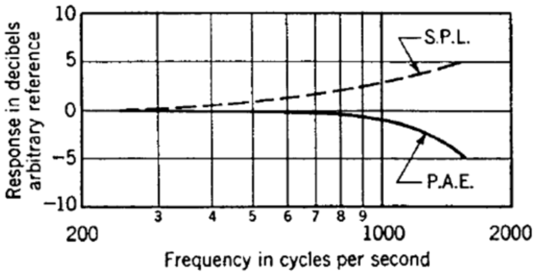
$$R_{MT} = \frac{B^2 l^2}{\sqrt{(R_g + R_E)^2 + \omega^2 L^2}} + (R_{MS} + 2\Re_{MR}) \sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R_g + R_E}} \qquad 7\text{-}41$$

$$X_{MT} = (\omega M_{MD} + 2X_{MR}) \sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{(R_g + R_E)^2}}$$

$$= \frac{\omega L B^2 l^2}{(R_g + R_E)^2 \sqrt{1 + [\omega^2 L^2/(R_g + R_E)^2]}} \qquad \text{7-42 سلطان}$$

إذا افترضنا الثوابت الموجودة في المثال 7ـ2، نحصل على المنحنى المتصل المبين في الشكل 7ـ15.

من الواضح أنه، فوق $f = 1000\text{Hz}$ ، فإن كفاءة القدرة المتاحة تتناقص.



الشكل 7ـ15 منحنيات كفاءة القدرة المتاحة النسبية ومستوى ضغط الصوت على المحور الرئيسي لسماعة 12 بوصة نموذجية في حاجز صندوق – مغلق. يكون المستوى المرجعي اختياري.

الآن، دعنا نعين مستوى ضغط الصوت على المحور الرئيسي للسماعة، باستخدام المعادلة 7ـ34. يتم تعيين دليل التوجيهية لمكبس في أنبوبة طويلة من المعادلة 4ـ20. تم تمثيل بالمنحنى المتقطع في الشكل 7ـ15. من الواضح أن دليل التوجيهية يكون ذو قيمة كبيرة في إبقاء استجابة التردد على المحور الرئيسي حتى إلى الترددات الأعلى. ما زال عند ترددات أعلى، تحدث حالات رنين للمخروط، كما قلنا قبل ذلك، يتم الحصول على منحنى استجابة المثالي المبين في الشكل 7ـ8.

مراجع هذا الباب

1- للمزيد من القراءة سيجد الطالب الكتب التالية مفيدة:

H.F. Olson "Elements of Acoustical Engineering," 2nd ed., Chap. VI, Van Nostrand Company, Inc. New York, 1947; M.S. Corrington, Amplitudes and Phase Measurements on Loudspeakers Cones, Proc. IRE, 39: 1021-1026 (1951); Transient Testing of Loudspeakers, Audio Engineering, 34: 9-12 (August, 1951).

2- M.S. Corrington, Amplitude and Phase Measurements on Loudspeaker Cones, Proc. IRE, 39: 1021-1026 (1951).

الباب الثامن

أوعية السماعات الصوتية

LOUDSPEAKERS ENCLOSURES

الجزء التاسع عشر – الأوعية البسيطة

إن أوعية السماعات هي الموضوع الأكثر خلاف بين المواضيع الأخرى المرتبطة بعملية إعادة إنتاج الموسيقى العالية – الدقة الحديثة. لأن سلوك الأوعية غير مفهوم بشكل واضح، ولأنه لا يوجد مرجع واحد موثوق به في الموضوع، فإن الأراء وشبه النظريات الموضوعة على تأثيرات الأوعية على استجابة السماعة عديدة ومتعارضة. إن المشكلة تزداد تعقيدا لأن تصميم الأوعية يجب أن يؤخذ في الاعتبار فقط عن طريق المعرفة الكاملة لسمات السماعة والمكبر المتاح، وتلك البيانات التي لا تتوفر في الظروف الطبيعية من قبل المصنع.

جزء كبير من صعوبة اختيار السماعة ووعائها ينشأ من حقيقة أن العوامل النفسية –الصوتية المتضمنة في إعادة إنتاج الكلام والموسيقى غير مفهومة.

سيصنف المستمعون درجة – طلب تصنيع أربع سماعات متماثلة ظاهريا وموضوعة في أربعة أوعية متماثلة بشكل مختلف. تمت الإشارة إلى أنه إذا اختار فرد ما مكوناته الخاصة، وبني وعائه الخاص، واقتنع بأنه قام باختيار التصميم الحكيم، فإن الأصوات التي تصدرها سماعته الخاصة ستكون أفضل لديه مما تصدره أى سماعة أخرى لأي شخص آخر. في هذه الحالة، يبدو أن استجابة تردد السماعة يلعب دور ثانوى في تكوين وجه نظر الشخص.

في هذا الباب، سوف نناقش المشكلة فقط من الناحية الفيزيائية. يجب أن يكون المصمم قادرا، بواسطة هذه المعلومات، على تحقيق أى منحنى معقول يرغبه لاستجابة – التردد. أبعد من ذلك، يجب عليه أن يبحث عن المعلومات في أى مكان آخر أو يجب عليه تقرير ما شكل منحنى استجابة ـ التردد الذي سيعطي سرور أعظم لنفسه وللمستمعين الآخرين.

بفضل معلومات هذا الفصل، يجب أن يكون الدارس المتحمس قادرا على أداء حسابات السماعة ذات المستوى العالي ـ الدقة (إذا كان يفهم نظرية الدائرة – المترددة) ومنحنى استجابة ـ التردد لمجموعة تتكون من مكبر وسماعة وحاجز. تم تقديم رسوم التصميم البيانية لتبسيط الحسابات، وثلاثة أمثلة كاملة طويلة (مضجرة)، لكن ليس هناك طريق مختصر غير ذلك إلى الجواب.

كما ذكرنا سابقا، تستند كل الحسابات على نظام م كجم ث. يوجد جدول التحويلات في الملحق 2 والذي يسمح بسهولة بالتحويل من الوحدات الإنجليزية. إن ميزة العمل مع الأمتار والكيلوجرامات هو أن كل الكميات الكهربية يمكن التعبير عنها بشكل طبيعى بالوات، الفولت، الأوم، والأمبير. يعتقد أن استخدام نظام م كجم ث يؤدى إلى أرباك أقل من استخدام نظام سم جم ث [1]، حيث القدرة تكون بوحدات بالإرج لكل ثانية، الجهود الكهربية تكون بالفولت $\times 10^8$، والتيار الكهربي يكون بالأمبير $\times 10^{-1}$، والمعاوقه تكون بالأوم $\times 10^9$.

1.8 سماعة المشعاع – المباشر بدون حاجز

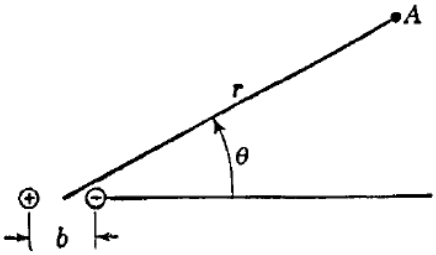
الحاجز هو بناء لعزل إشعاع الجانب الأمامي من الحجاب الحاجز للسماعة عن إشعاع الجانب الخلفى. يمكن فهم ضرورة عزل الجانب الأمامي عن الجانب الخلفي إذا اعتبرنا أن سماعة بدون حاجز عند ترددات منخفضة تكون مكافئة لزوج من المصادر البسيطة الكروية ذات شدة متساوية موضوعين بالقرب من بعضهما البعض وينبضان في طور واحد (انظر الشكل 1.8). الجانب الخلفي للحجاب الحاجز للسماعة يكافئ أحد هذه المصادر والجانب الأمامي يكافئ المصدر الأخر.

إذا قمنا بقياس مقدار ج م م ضغط الصوت p عند النقطة التي تبعد مسافة كبيرة عن المصدرين A (كدالة في التردد f)، وإذا أبقينا السرعة الحجمية لكل منهما ثابتة، فإننا نجد من المعادلة 15.4 أن،

$$|p| = \frac{\rho_o f^2 U_o b \pi}{r c} \cos\theta \qquad 8\text{-}1$$

حيث U_o هي ج م م شدة كل مصدر بسيط بالمتر المكعب لكل ثانية، b المسافة الفاصل بين

المصادر البسيطة بالمتر، ρ_o كثافة الهواء بالكيلوجرام لكل متر مكعب وتساوى 1.18kg/m^3عند درجة الحرارة والضغط المعتاد، τ المسافة بالأمتار بين المصادر إلى النقطة A . افترض أن $r >> b$. θ هي الزاوية المبينة بالشكل 1.8، c سرعة الصوت بالمتر لكل ثانية (344.8 m/sec في الظروف الطبيعية). بمعنى أخر، بالنسبة للسرعة الحجمية – الثابتة لحجاب السماعة، الضغط p عند مسافة r يتناسب طرديا مع مربع التردد f ومع جيب تمام الزاوية θ وعكسيا مع r . بدلالة الديسيبل، يتزايد ضغط الصوت بمعدل 12 ديسيبل لكل أوكتاف.



الشكل 1.8 زوج من مصادر الصوت المتماثلة تكافئ حجاب حاجز مهتز عند الترددات المنخفضة. تبعد النقطة A مسافة r وزاوية θ مع محور السماعة.

في حالة سماعة حقيقية بدون حاجز، أسفل الرنين الأول حيث يكون النظام محكوما-بالجسوء، فإن سرعة الحجاب لا تكون ثابتة بل تتضاعف مع كل مضاعفة للتردد. هذا يكون عبارة عن زيادة في السرعة بمقدار 6 ديسيبل لكل أوكتاف. بالتالي، فإن الضغط p من سماعة بدون حاجز يزداد بمعدل $12 + 6 = 18$ db لكل أوكتاف زيادة في التردد. أعلى من تردد الرنين الأول، يكون النظام محكوم – بالكتلة، تتناقص سرعة الحجاب بمعدل 6 ديسيبل لكل أوكتاف في التردد. بالتال، في تلك المنطقة، يزداد الضغط p بمعدل $12 - 6 = 6$ db لكل أوكتاف زيادة في التردد.

2.8 حاجز لانهائى

في الباب السابق تحدثنا عن السماعات ذات المشعاع المباشر في حاجز لانهائى. بالرجوع إلى الشكل 6.7 يتضح أنه مع حاجز لانهائى، تتحسن استجابة السماعة ذات المشعاع المباشر عنه في لتلك السماعة بدون الحاجز المشار إليها. تم بيان أنه في حالة أعلى من تردد الرنين الأول عادة تكون

الاستجابة مستوية مع التردد مالم يكون حاصل الضرب BL كبير (منطقة C) وأنه في حال تحت تردد الرنين الأول، تتناقص الاستجابة بمعدل 12 ديسيبل لكل أوكتاف بدلا من 18 ديسيبل لكل أوكتاف. بالتالي، فإن عزل الجانب الأمامي لحجاب السماعة عن الجانب الخلفي بواسطة حاجز لانهائى يكون مفيد بالتأكيد.

عمليا، فإن مكافئ حاجز لا نهائى يكون وعاء كبير جدا، مخمد بشكل جيد بواسطة مادة ممتصة. المثال العملي لذلك هو تثبيت (تعليق) السماعة في أحد جوانب دولاب مملوء بالملابس، مع السماح للجانب الأمامي للسماعة بالإشعاع إلى غرفة الاستماع المجاورة.

إن تخطيطات الرسوم البيانية التي تغطى أداء سماعة المشعاع المباشر في حاجز لانهائى تكون مماثلة تماما لتلك الموجود في صندوق مغلق سوف نقدم هذه المخططات في الفصل 8ـ5.

3ـ8 حاجز مستوى محدد –الحجم

تبين المناقشة السابقة أنه من المرجح تغليف أحد جوانب السماعة وعزله عن الجانب الأخر، وذلك بتثبيت السماعة في الوعاء (الصندوق). الطريقة الأخرى الممكنة هي تثبيت السماعة في حاجز مستوى (مسطح) ذى حجم محدود، يقف بحرية عند أحد أطراف غرفة الاستماع.

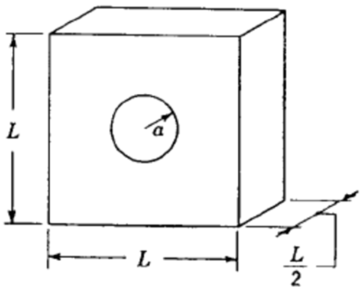
على أية حال، إن أداء سماعة في حاجز مستوى واقف – بحرية يترك الكثير بدون تفسير. إذا كان الطول الموجى للنغمة المشعة أكبر من ضعف أصغر بعد جانبى للحاجز، فإن السماعة سوف تعمل وفقا للمعادلة 8ـ1. هذا يعنى أن الحاجز المستوى المحدود الذي يتصرف بالتقريب مثل حاجز لانهائي عند 50 هيرتز، يجب أن يكون بعده الجانبي الأصغر 3.5 متر تقريبا (11.5 قدم). لكن، حتى فوق هذا التردد، موجات الصوت التي تسافر من خلف السماعة تنعكس على الجدران وتتقابل مع تلك الموجات المشعة من الجبهة وتسبب تقويات أو تلاشيات متبادلة للصوت عندما تكون الموجات في طور واحد أو خارج الطور عند ترددات معينة في أجزاء معينة من الغرفة. يمكن تخفيض هذا التأثير بوضع السماعة في مركز الحاجز، لكن لا يمكن أن يزال بسبب الارتدادات (الانعكاسات) من جدران الغرفة خلف السماعة. أيضا، الحاجز المستوى يجعل السماعة أكثر توجيهية من المرغوب لأنه في مستوى الحاجز يميل ضغط الصوت إلى التناقص إلى الصفر بغض النظر عن حجم الحاجز.

4.8 خزانات الخلفية – المفتوحة

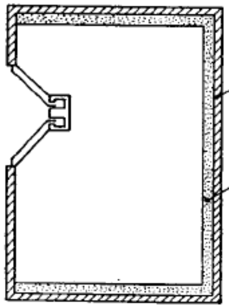
خزانة الخلفية – المفتوحة هي ببساطة صندوق يغيب فيه أحد الجوانب وتكون السماعة فيه مثبتة في الجانب المقابل للخلفية المفتوحة. الكثير من راديوهات المنازل تكون من هذا النوع. يكون أداء تلك الخزانة تقريبا مثل أداء الحاجز المستوى الذي يعطى نفس طول المسار بين جبهة ومؤخرة السماعة. يحدث تأثير إضافى، والذي يكون غير مرغوب في العادة، عند التردد الذي عنده يقترب عمق الصندوق من ربع الطول الموجى. عند هذا التردد، يعمل الصندوق كأنبوبة رنين وتشع قدرة من الجانب الخلفي للسماعة أكبر منها عند الترددات الأخرى. علاوة على ذلك، يمكن أن يتحد الصوت من الجانب الخلفي في الطور مع الصوت من الجانب الأمامي عند نفس هذا التردد، ويتم الحصول على قمة كبيرة غير معتادة في الاستجابة.

5.8 حاجز الصندوق – المغلق[1,2]

أكثر الأنواع المستخدمة من حاجز السماعة هو صندوق مغلق وتثبت السماعة في أحد جوانبه. هنا، سوف يناقش هذا النوع بالتفصيل. في هذا النوع يكون الجانب الخلفي للسماعة معزول بالكامل عن الجانب الأمامي. تبين الأشكال 2.8 و3.8 أنواع مألوفة لحواجز الصندوق – المغلق. يتم صنع الجوانب بحيث تكون صلبة بقدر الإمكان باستخدام بعض المواد مثل الخشب الحبيبى (5-طيات) يتراوح سمكه من 0.75 إلى 1.0 بوصة ويكون سميك ومثبت لكي يمنع الرنين. يجب عمل تسريب هواء بطيء في الصندوق لكي لا تسبب التغيرات في الضغط الجوى إزاحة لمكان الحجاب الطبيعى.



الشكل 2.8 سماعة بقطر a مثبتة في صندوق غير مبطن له الأبعاد $L \times L \times L/2$. بالرغم من أن نوع الصندوق هذا ملائم للتحليل، إلا أن التركيب المبين في الشكل 3.8 يستخدم بشكل أكثر شيوعا.



الشكل 8ـ3 صندوق خشب حبيبى نموذجى مع سماعة مثبتة بعيدا عن مركز أحد الجوانب ومبطن بطبقة من مادة صوتية ممتصة ناعمة.

ملخص لتصميم حاجز الصندوق المغلق

1- لتعيين حجم الصندوق المغلق:

(أ) أوجد قيم f_o (بدون الحاجز) و C_{MS} من الفصل 8ـ7. يمكن تعيين قيم تقريبية من الشكل 8ـ5ب و8ـ5 د.

(ب) عين S_D من الشكل 8ـ5أ وأحسب $C_{AS} = C_{MS} S_D^{\ 2}$.

(ج) قرر النسبة المئوية للإزاحة العليا في الرنين نتيجة إضافة الصندوق والتي سوف تسمح بها كخطأ ومن المنحنى السفلى في الشكل 8ـ11 عين قيم C_{AB} / C_{AS} ومن ثم C_{AB}.

(د) بمعلومية C_{AB} عين حجم الصندوق من المعادلة 8ـ7.

(هـ) شكل وبطن الصندوق طبقا للفصول 8ـ9 و8ـ5.

2- لتعيين استجابة السماعة عند الترددات الأقل من تردد رنين الحافة (500 هيرتز تقريبا)

(أ) أوجد قيم M_{MD}، R_{MS}، C_{MS}، Bl، R_E، و S_D من الفصل 8ـ7. قرب القيم التي يمكن الحصول عليها من الشكل 8ـ5، الجدول 8ـ1 والجملة السابقة للجدول 8ـ2.

(ب) عين $M_{AD} = M_{MD} / S_D^{\ 2}$، $C_{AS} = C_{MS} S_D^{\ 2}$، و $R_{AS} = R_{MS} / S_D^{\ 2}$.

(ج) عين $\Re_{AR}$، X_{AR}، M_{A1}، C_{AB}، و M_{AB} من المعادلات 8ـ4 حتى 8ـ8.

(د) إذا كانت مقاومة التدفق وحجم التبطين الصوتى معلومتين، عين R_{AB} من الشكل 8ـ8. غير ذلك، أهمل R_{AB} كتقريب أولى.

(هـ) عين مقاومة الخرج الحقيقية (وليست المقدرة) للمكبر القدرة، R_g. تكون كل الثوابت اللازمة لحل الدائرة في الشكل 8ـ4 متوفرة الأن.

(و) عين المقاومة الكلية، R_A والكتليه الكلية، M_A، والمطاوعة الكلية، C_A، من المعادلات 8ـ19 حتى 8ـ21. عين ω_o و Q_T من المعادلات 8ـ22 و8ـ23.

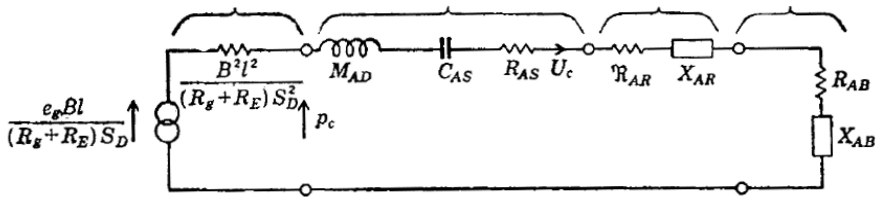
(ز) عين ضغط الصوت المرجعي عند المسافة r من السماعة بواسطة المعادلة 8ـ27.

(ح) عين نسب تردد الدفع الذي تطلب الاستجابة عنده إلى تردد الرنين ω_o، أي ω / ω_o. عين النسبة M_A / R_A.

(ط) أوجد استجابة الرنين بالديسيبل منسوب إلى ضغط الصوت المرجعي مباشرة من الأشكال 8ـ12 و8ـ13.

الدائرة التناظرية

يؤثر الصندوق المغلق على الجانب الخلفي لحجاب السماعة. يمكن تمثيل هذا التأثير (التفاعل) بمعاوقة صوتية والتي عند الترددات المنخفضة تكون مطاوعة تعمل على جسوء (تصليب) حركة الحجاب ورفع تردد الرنين. عند الترددات العالية، يكون تفاعل الصندوق، إذا لم يكن مبطن، هو تفاعل دائرة متعددة الرنين. هذا يكافئ معاوقة تتغير بشكل دوري مع التردد من صفر إلى ما لانهاية إلى صفر إلى ما لانهاية وهكذا. تسبب هذه المعاوقة المتغيرة تكون قمم ومنخفضات مقابلة في منحنى الاستجابة – التردد.



الشكل 4.8 مخطط الدائرة لسماعة بمشعاع – مباشر معلقة في حاجز صندوق مغلق. تصلح هذه الدائرة للتردد أسفل من 400 هيرتز. السرعة الحجمية للحجاب هي U_c، e_g هو جهد الدائرة – المفتوحة للمولد، R_g مقاومة المولد، R_E مقاومة ملف الصوت، B كثافة فيض فجوة الهواء، l طول سلك لفات ملف الصوت، S_D المساحة الفعالة للحجاب، M_{AD} الكتلة الصوتية للحجاب وملف الصوت، C_{AS} المطاوعة الصوتية الكلية للتعليقات، R_{AS} المقاومة الصوتية في التعليقات، $\Re_{AR}$، X_{AR} معاوقة الإشعاع – الصوتى من الجانب الأمامي للحاجب، R_{AB}، X_{AB} معاوقة التحميل الصوتى للصندوق على الجانب الخلفي للحجاب الحاجز.

إذا كان الصندوق مبطنا بمادة ممتصة – للصوت، فإن حالات الرنين هذه تخمد وعند الترددات العالية يكون الجانب الخلفي للحجاب محملا بمعاوقة تساوى معاوقة الحجاب ذات حاجز لانهائى يشع في الفضاء الحر.

عند الترددات المنخفضة، حيث يهتز الحجاب كوحدة واحدة لذلك يمكن معالجته كمكبس صلب، يمكن رسم الدائرة الكاملة الكهرو-ميكانو-صوتية التي تصف سلوك سماعة الصندوق – المغلق. هذه الدائرة مبينة في الشكل 8-4، وتم عملها بالطرق المذكورة في الجزء السابع عشر.

تظهر من هذه الدائرة بعض الحقائق الشيقة حول السماعات. الأولى، تظهر مقاومة المولد الكهربي (مكبر القدرة) R_g ومقاومة ملف – الصوت R_E في مقام أحدى المقاومات المبينة. هذا يعنى انه إذا كان مطلوب نظام عالى التخميد، فإنه يكون من الممكن تحقيق ذلك باستخدام مكبر قدرة بمقاومة خرج منخفضة جدا. الثانية، تكون الدائرة من نوع الدائرة الرنانة البسيطة لذلك يمكننا الحل للسرعة الحجمية لملف –الصوت (تساوى السرعة الخطية مضروبة في مساحة الحجاب) عن طريق استخدام منحنيات الرنين العامة. لهذا، تصبح مشكلتنا هي تقدير عناصر الدائرة ومن ثم تعيين الأداء باستخدام النظرية القياسية للدوائر الكهربية LRC التوازى.

قيم عناصر الدائرة –الكهربية

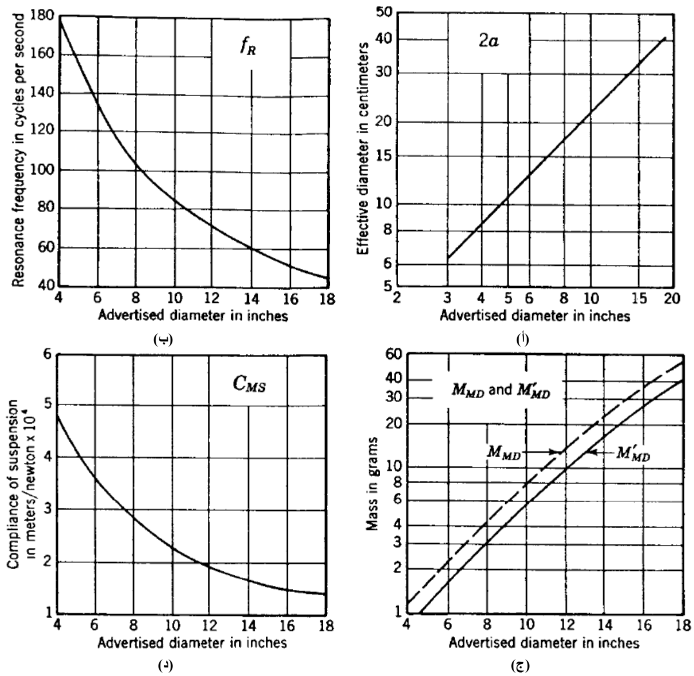
تكون كل العناصر المبينة في الشكل 8-4 في الوحدات التي تعطى معاوقة صوتية في النظام م كجم ث أوم صوتى (نيوتن-ثانية/م^5)، والذي يعنى أن كل العناصر تكون محولة إلى الجانب الصوتى من الدائرة. هذا يفسر ظهور المساحة الفعالة للحجاب الحاجز S_D في الجزء الكهربي من الدائرة. تكون الكميات المبينة على النحو: e_g جهد الدائرة – المفتوحة بالفولت للمكبر السمعى الذي يقود السماعة، B كثافة الفيض في فجوة الهواء بالوبر لكل متر مربع (1 وبر/م^2 = 10000 جاوس)، l طول السلك الملفوف على ملف الصوت بالمتر (1 متر = 39.37 بوصة)، R_g المعاوقة الكهربية (مفترض أنها مقاومية) بالأوم للمكبر الصوت، R_E المقاومة الكهربية للسلك ملف الصوت بالأوم، a نصف القطر الفعال للحجاب الحاجز بالمتر، و $S_D = \pi a^2$ المساحة الفعالة للحجاب بالمتر المربع.

قيم عناصر الدائرة –الميكانيكية

عناصر الجزء الميكانيكى للدائرة تختلف هنا عن تلك الموجودة في الجزء السابع عشر التي فيها

تكون متحولة إلى الجزء الصوتى من الدائرة لكى تعطى المعاوقات الصوتية بالأوم الصوتى في م كجم ث. تكون الكميات على النحو التالي: $M_{AD} = M_{MD} / S_D{}^2$ الكتلة الصوتية للحجاب وملف الصوت بالكيلوجرام لكل متر^4، M_{MD} كتلة الحجاب وملف الصوت بالكيلوجرام، $C_{AS} = C_{MS} S_D{}^2$ المطاوعة الصوتية لتعليقات الحجاب بالمتر^5 لكل نيوتن (1 نيوتن = 10^5 داين)، C_{MS} المطاوعة الميكانيكية بالمتر لكل نيوتن، $R_{AS} = R_{MS} S_D{}^2$ المقاومة الصوتية للتعليقات بالأوم الصوتى في م كجم ث، R_{MS} المقاومة الميكانيكية للتعليقات بالأوم الميكانيكى.

كما سوف نستعرض بمثال مختصر، يمكن قياس هذه الكميات بسهولة بواسطة إعداد بسيط في المختبر. لكن من المفيد أن يكون متوفر عندنا قيم مثالية لثوابت السماعة تعطى حسابات تقريبية، وهذه مبينة في الشكل 8ـ5 وفي الجدول 8ـ1. يتغير مقدار كثافة الفيض لفجوة – الهواء B من 0.6 إلى 1.4 وبر/م^2 وهذا يعتمد على تكلفة وحجم السماعة الصوتية.



الشكل 8ـ5 (أ) العلاقة بين القطر الفعال للسماعة وقطرها المعلن، (ب) ترددات الرنين المتوسطة لسماعات بمشعاع – مباشر عن التثبيت في حاجز لانهائى مقابل الأقطار المعلنة. (ج) متوسط كتلة ملفات الصوت وحجاب السماعات كدالة في الأقطار المعلنة. M_{MD} كتلة الحجاب بما فيها كتلة سلك ملف الصوت، و M'_{MD} كتلة الحجاب

بدون كتلة سلك ملف الصوت. (د) المطاوعات المتوسطة لتعليقات السماعات كدالة في الأقطار المعلنة. لاحظ، على سبيل المثال، أن 3 على المحور الراسي تعنى 3×10^{-4} م / نيوتن.

قيم معاوقة الإشعاع (الجانب الأمامي)

دائما، تدخل العنا صر الـ سمعية الجديدة على مجال علم الـ صوتيات بعض الـ صعوبة لأنها لا تتـ صرف بـ شكل جيد. بمعنى أخر، تتغير المقاومة مع التردد، وعندما تكون الأطوال الموجية قصير فإن الكتل تفعل نفس الشيء.

تكون المعاوقة الإشعاعية للإشعاع من الجانب الأمامي للحجاب ببساطة طريقة للبيان تخطيطيا أن للهواء كتلة، التي يجب أن يتغلب على قصورها الذاتي بحركة الحجاب الحاجز، وأنه قادر على قبول القوة من الـ سماعة. يعتمد مقدار المعاوقة الإ شعاعية للجانب الأمامي على إذا ما كان الـ صندوق كبير جدا بحيث يقترب من الحاجز اللانهائى، أو إذا ما كان الـ صندوق له أبعاد أقل من 0.6 في 0.6 في 0.6 متر (7.6 قدم مكعب)، وفي تلك الحالى يكون السلوك مختلف قليلا.

الجدول 1.8 قيم نموذجية لـ l، R_E و M_{MC} لأقطار معلنة مختلفة للسماعات.

القطر المعلن Advertised diam, in.	المعاوقة الإسمية Nominal impedance, ohms	l, m	R_E, ohms	M_{MC}, mass of voice coil, g
4–5	3.2	2.7	3.0	0.35–0.4
6–8	3.2	3.4	3.0	0.5 –0.7
10–12	3.2	4.4	3.0	1.0 –1.5
12	8.0	8.0	7.0	3
15–16	16.0	...	...	12

صندوق كبير الحجم جدا (يقارب حاجز لانهائى)

الكمية $\Re_{AR}$ هي المقاومة الإشعاعية لمكبس في حاجز لانهائى بوحدات الأوم الصوتى في م كجم ث. تتعين هذه المقاومة من المحور الرأسى في الشكل 3-5 مضروب في $407/S_D$. إذا كان التردد منخفض بحيث يكون المحيط الفعال للحجاب ($2\pi a$) أقل من λ، بمعنى، $ka<1$، حيث $k=2\pi/\lambda$ فإن $\Re_{AR}$ يمكن أن تحسب من العلاقة،

$$\Re_{AR}\approx\frac{0.159\omega^2\rho_o}{c}\approx0.0215f^2 \qquad \text{سلطان } 8\text{-}2$$

الكمية X_{AR} هي المفاعلة الإشعاعية لمكبس في حاجز لانهائى. تتعين هذه المفاعلة من المحور الرأسى في الشكل 5ـ3 مضروب في $407/S_D$. عندما $ka<1$ ، فإن X_{AR} تعطى بالعلاقة،

$$X_{AR} = \omega M_{A1} = \frac{0.270\omega\rho_o}{a} \approx \frac{2.0\omega f}{a} \qquad \text{8-3أ سلطان}$$

و

$$M_{A1} = \frac{0.270\rho_o}{a} \approx \frac{0.318}{a} \qquad \text{8-3ب سلطان}$$

<u>صندوق متوسط ـ الحجم (أقل من 8 قدم^3)</u>

الكمية $\Re_{AR}$ هي تقريبا المقاومة الإشعاعية لمكبس في نهاية أنبوبة طويلة. تتعين هذه المقاومة من المحور الرأسى في الشكل 5ـ7 مضروب في $407/S_D$. إذا كان التردد منخفض بحيث يكون المحيط الفعال للحجاب ($2\pi a$) أقل من λ ، فإن $\Re_{AR}$ يمكن أن تحسب من العلاقة،

$$\Re_{AR} = \frac{\pi f^2\rho_o}{c} \approx 0.01076 f^2 \qquad \text{8-4 سلطان}$$

الكمية X_{AR} هي المفاعلة الإشعاعية لمكبس في نهاية أنبوبة طويلة. تتعين هذه المفاعلة من المحور الرأسى في الشكل 5ـ7 مضروب في $407/S_D$. عندما $ka<1$ ، فإن X_{AR} تعطى بالعلاقة،

$$X_{AR} = \omega M_{A1} = \frac{\omega(0.1952)\rho_o}{a} \approx \frac{1.45\omega f}{a} \qquad \text{8-5أ سلطان}$$

و

$$M_{A1} = \frac{(0.1952)\rho_o}{a} \approx \frac{0.23}{a} \qquad \text{8-5ب سلطان}$$

<u>معاوقة الصندوق – المغلق (الجانب ـ الخلفى)</u>

المعاوقة الصوتية Z_{AB} للصندوق المغلق الذي تثبت فيه السماعة هي مفاعلة X_{AB} على التوالى مع المقاومة $\Re_{AB}$. كما سوف نرى فيما بعد، لا تتصرف X_{AB} ولا $\Re_{AB}$ بشكل جيد بالنسبة للأطوال الموجية الأقصر من 8 أمثال البعد الأصغر للصندوق (عند 1000 هيرتز، طول الموجة عند 72

درجة فهرنهيت تكون حوالى 13.5 بوصة. عند 500 هيرتز يكون 27 بوصة. عند 2000 هيرتز يكون6.8 بوصة وهكذا). إذا كانت المسافة خلف السماعة أقل من $\lambda / 4$ تقريبا، فإن المفاعلة تكون سالبة. إذا كانت هذه المسافة أكبر من $\lambda / 4$ ، فإن المفاعلة تكون في العادة موجبة إذا وجدت مادة ممتصة في الصندوق بحيث يكون التحميل على الجانب الخلفي للسماعة تقريبا هو تحميل الحاجز اللانهائى.

الصندوق المتوسط ـ الحجم

عند تلك الترددات حيث يكون طول موجة الصوت أكبر من 8 أمثال البعد الأصغر للصندوق ($4L < \lambda$ للصندوق في الشكل 2ـ8)، فإن المفاعلة الميكانيكية الممثلة للجانب الخلفي من السماعة تكون عبارة عن كتلة ومطاوعة على التوالى،

$$X_{AB} = \omega M_{AB} - \frac{1}{\omega C_{AB}} \qquad \text{8-6 سطان}$$

حيث

$$C_{AB} = \frac{V_B}{\gamma P_o} \qquad \text{8-7 سطان}$$

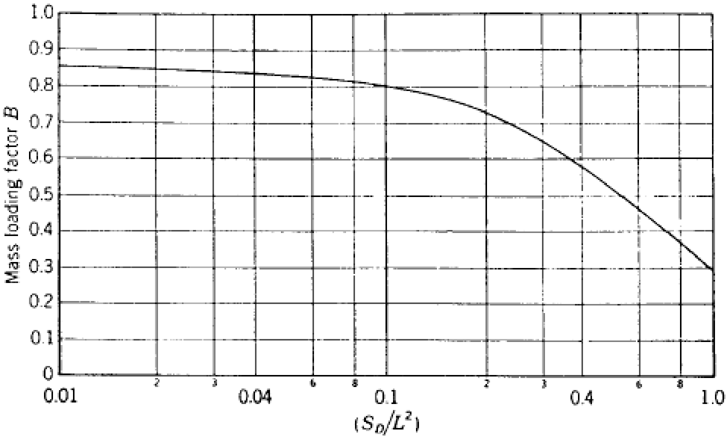
هي المطاوعة الصوتية للصندوق بالمتر^5 لكل نيوتن و

$$M_{AB} = \frac{B\rho_o}{\pi a} \qquad \text{8ـ8 سطان}$$

هي الكتلة الصوتية بالكيلوجرام لحمل الهواء على الجانب الخلفي للحجاب نتيجة الصندوق، وحيث: V_B حجم الصندوق بالمتر المكعب. يجب طرح حجم السماعة من الحجم الكلى للصندوق للحصول على هذا الرقم (V_B). كتقريب أولى، حجم السماعة بالمتر المكعب يساوى 0.4 مضروب في القطر المعلن (بالمتر) مرفوع للرتبة الرابعة. $\gamma = 1.4$ للهواء في حالة الانضغاط الأديباتيكى، P_o هو الضغط الجوي بالنيوتن لكل متر مربع (حوالي 10^5 في الأيام العادية). إذا $\pi a = \sqrt{S_D \pi}$ كانت السماعة غير دائرية، B ثابت معطى في الشكل 6ـ8، يعتمد على نسبة المساحة الفعالة

للحجاب الحاجز للسماعة S_D إلى المساحة L^2 لجانب الصندوق المثبت فيه السماعة.

كمثال، افترض أن عمق الصندوق $L/2 = 1\text{ft}$. حينئذ، بما أن المعادلة 8-6 تتقيد بمدى التردد حيث $L/2 < \lambda/8$، فإن أقصى تردد له يكون 140 هيرتز.



الشكل 8-6 معامل تصحيح النهاية B لحد المفاعلة للمعاوقة عند الجانب الخلفي لحجاب سماعة مثبتة في صندوق من النوع المبين في الشكل 8-2. المفاعلة الصوتية للصندوق على الحجاب تعطى بالعلاقة $X_{AB} = -\gamma P_o/\omega V_B + \omega B\rho_o/\pi a$. في حالة الحجاب اللا دائري تكون المساحة، S_D، $\pi a = \sqrt{S_D \pi}$.

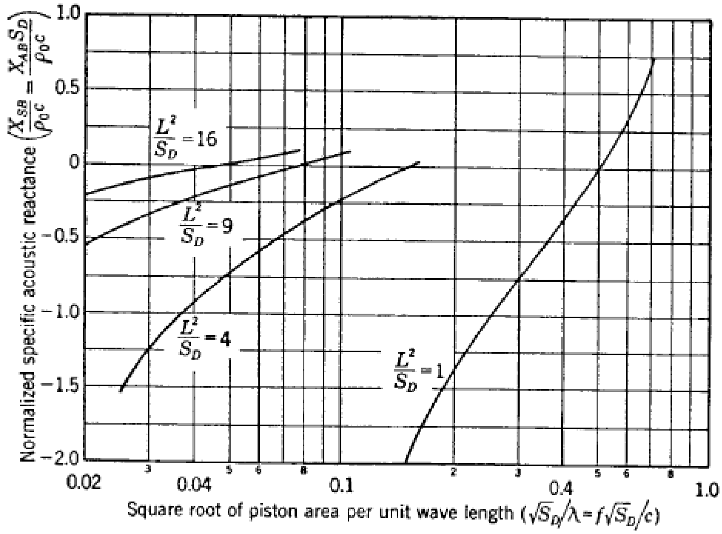
الصندوق الكبير- الحجم

إذا كان الصندوق كبير بحيث أصغر بعد له يكون أكبر من $\frac{1}{8}$ الطول الموجي وإذا كان غير مبطن، فإن المفاعلة الميكانيكية تتعين من الشكل 8-7.

معاوقة صندوق مغلق مع تبطين ممتص

نوع دالة المفاعلة المبينة في الشكل 8-7 ليس مرغوب جدا بسبب القيمة العالية جدا التي تصل إليها X_{AB} عند النمط الطبيعي الأول لاهتزاز (الرنين) الصندوق، الذي يحدث عندما يساوي عمق الصندوق نصف طول الموجة. تقلل المفاعلة العالية القدرة المشعة إلى قيمة صغيرة جدا. لتخفيض مقدار X_{AB} عند نمط الاهتزاز الأول، توضع بطانة صوتية في الصندوق. يجب أن تكون هذه البطانة عالية الامتصاص عند تردد هذا النمط من الاهتزاز وعند كل الترددات الأعلى. بالنسبة

للصناديق ذات الحجم – الطبيعي، تكون البطانة المقبولة عبارة عن طبقة سمكها 1 بوصة من طبقة الصوف المعدني المتماسك، ألياف زجاجية متماسكة، شعر متماسك، أو ألياف خشب متماسكة، الخ. بالنسبة للخزانات الصغيرة، حيث أكبر بعد يقل عن 18 بوصة، فإن طبقة بطانة سمكها نصف بوصة تكون مقبولة.



الشكل 7.8 المفاعلة النوعية الصوتية للصندوق المغلق $L \times L \times L/2$ مع حجاب مساحته S_D في منتصف الوجه $L \times L$. يحدث مكان النمط الطبيعي الأول للاهتزاز عندما $L/2 = \lambda/2$ ، أي أنه يحدث عند $\sqrt{S_D}/\lambda = 0.25$ في حالة $L^2/S_D = 16$ وعند 0.333 في حالة $L^2/S_D = 9$ ، وعند 0.5 في حالة $L^2/S_D = 4$ ، وعند $\sqrt{S_D}/\lambda = 1$ في حالة $L^2/S_D = 1$.

عند الترددات المنخفضة، حيث يكون سمك البطانة أقل من 0.05 من الطول الموجى للصوت، فإن معاوقة الصندوق الممثلة للجانب الخلفي للحجاب الحاجز يساوى

$$Z_{AB} = R_{AB} + j X_{AB} \qquad 8\text{-}9$$

حيث X_{AB} تعطى في المعادلات 6.8 إلى 8.8 و

$$R_{AB} \approx \frac{R_{AM}}{\omega^2 C_{AB}{}^2 R_{AM}{}^2 + \left(1 + \frac{V_B}{\gamma V_M} + \frac{V_B{}^2}{\gamma V_M{}^2}\right)} \qquad 8\text{-}10$$

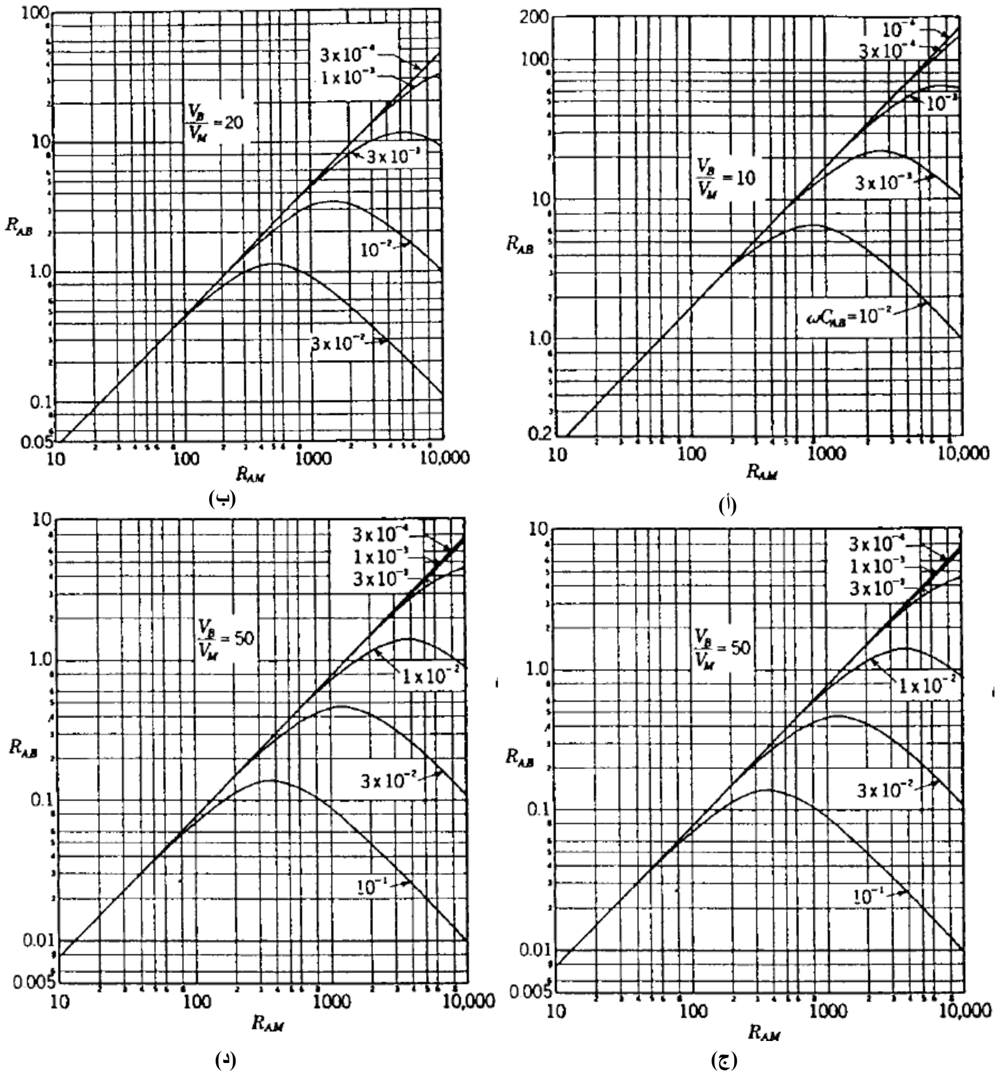
حيث $R_{AM} = R_f / 3S_M$ هو ثلث مقاومة التدفق الكلية لطبقة المادة الصوتية التي تبطن الصندوق مقسومة على مساحة المادة الصوتية S_M. الوحدات هي أوم صوتي في م كجم ث. مقاومة التدفق تساوى النسبة بين هبوط الضغط عبر عينة المادة والسرعة الخطية للهواء المار خلالها. بالنسبة للمواد الخفيفة الوزن، تكون مقاومة التدفق R_f في حدود 100 رايليى في نظام م كجم ث لكل بوصة سمك. بالنسبة للمواد الكثيفة مثل لوحة ألياف زجاجية PF أو قناة صوف صخرى عازل، فإن مقاومة التدفق قد تكون عالية حتى 2000 رايليى في نظام م كجم ث لكل بوصة سمك من المادة. على سبيل المثال، إذا كانت مقاومة التدفق لكل بوصة من المادة تساوى 500 رايليى، وكان السمك 3 بوصة والمساحة 0.2 متر مربع، فإن $R_{AM} = 1500/(3)(0.2) = 2500\,\text{mks acoustic ohms}$. عند كتابة هذه المعادلة أفترض أن المادة لا تشغل أكثر من 10٪ من حجم الصندوق.

V_B هو حجم الصندوق بالمتر المكعب بما فيه حجم مادة البطانة الصوتية. V_M هو حجم مادة البطانة الصوتية بالمتر المكعب. الرسومات التي تمثل المعادلة 8ـ10 تعطى بالشكل 8ـ8.

عند كل الترددات حيث يكون معامل امتصاص البطانة عالي (أكبر من 0.8 مثلا)، فإن معاوقة الصندوق المقابلة للجانب الخلفي من الحجاب سوف تكون مثل معاوقة مكبس في حاجز لانهائى يشع إلى الفضاء الحر، لذلك توجد Z_{AB} من الشكل 5ـ 3 أو المعادلات 8ـ2 و8ـ3. (يوجد في الباب العاشر جداول ومنحنيات معاملات الإمتصاص للمواد الشائعة.)

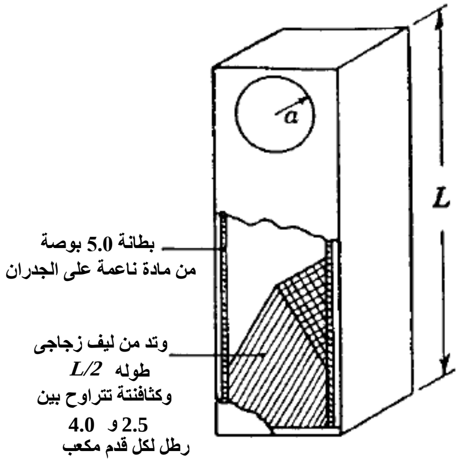
يمكن استخدام المادة الصوتية أيضا في تكبير حجم الهواء المحبوس. تكون الانضغاطات الغازية في موجة الصوت أديباتيكية في الظروف الطبيعية. إذا كان الفضاء الهوائى ممتلئ بالكامل بمادة ناعمة وخفيفة الوزن مثل القطن الكاذب (الكابوك) أو رغوة السيليو (ألياف الخشب المرغيه)، فإن الانضغاطات تصبح أيزوسيرمالية. هذا يعنى أن سرعة الصوت تتناقص من $c = 344.8\text{m/sec}$ إلى $c = 292\text{m/sec}$. بالرجوع للشكل 8ـ7 يتبين أن هذا يقلل المفاعلة عند الترددات المنخفضة تماما كما تفعل الزيادة في بعد الصندوق L. هذا يعنى أيضا أنه في المعادلة 8ـ7 تكون قيمة γ هي 1.0 بدلا من 1.4.

يبين الشكل 8ـ9 [3] نوع خاص من الصندوق المغلق مع بطانة ممتصة. هنا، تكون السماعة مثبتة بالقرب من نهاية الصندوق المستطيل ذى الطول L ومساحة مقطع عرضي تساوى بالتقريب πa^2، وهي المساحة الفعالة لحجاب السماعة. يستخدم وتد الليف الزجاجي الذي طوله هو $L/2$ لإنهاء (لتشطيب) الصندوق. تعطى المقاومة النوعية الصوتية R_{AB} والمفاعلة X_{AB} (مضروبة في $S_D/\rho_o c$) لهذا الصندوق في وجود وفي غياب الوتد معطاة في الشكل 8ـ10.



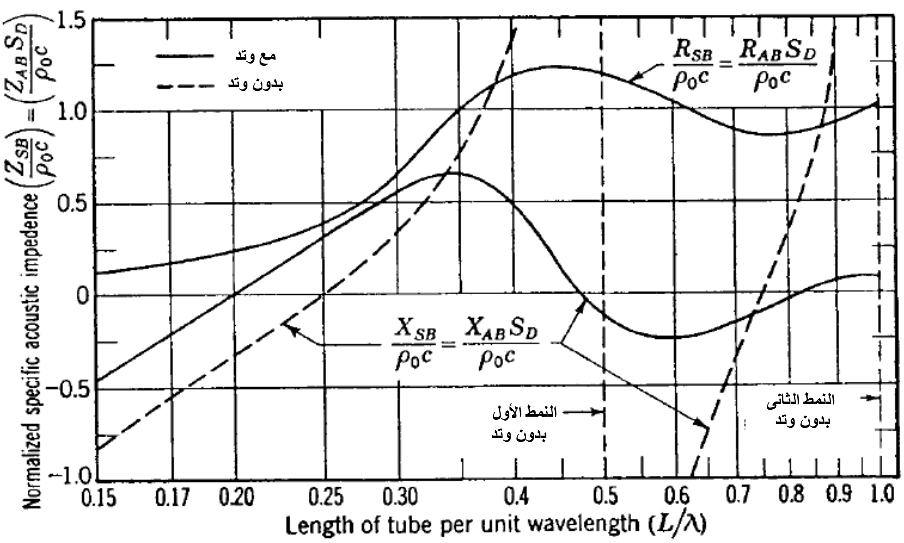
الشكل 8ـ8 منحنيات لتعيين المقاومة الصوتية R_{AB} لحاجز عبارة عن صندوق مغلق كدالة في

R_{AM} مع ωC_{AB} كمعامل. المخططات الأربعة هي نسب مختلفة لحجم الصندوق إلى حجم المادة الصوتية.



الشكل 9ـ8 خزانة من نوع خاص لتقليل إزاحة تردد رنين سماعة مثبتة في حاجز صندوق – مغلق.

يمكن ملاحظة ثلاثة أشياء مهمة عن المعاوقة: 1ـ لحجم ما، عند الترددات المنخفضة، تكون المفاعلية X_{AB} أقل منها في حالة الصندوق المبين في الشكل 8ـ2، 2ـ عند الترددات المرتفعة، تخمد حالات رنين الصندوق (أنماط الاهتزاز الطبيعية) بحيث تقترب R_{AB} من $\rho_o c / S_D$ ، كما تقترب X_{AB} من الصفر، 3ـ بين مناطق التردد هذه (أي أن $0.2 < L/\lambda < 0.5$)، فإن المفاعلة X_{AB} تكون موجبة.



الشكل 8-10 المعاوقة النوعية الصوتية المسواة (المطبعة) لأنبوبة لها طول L مع وتد ممتص مثبت عند النهاية. بدون وتد، $R_{SB}=0$.

تأثير مطاوعة الصندوق على تردد الرنين

دعنا نحلل تأثير حاجز صندوق – مغلق عند أدنى تردد رنين لسماعة بمشعاع – مباشر. بالنسبة للسماعة المثبتة في حاجز لانهائى، فإن تردد المفاعلة الصفرية تكون،

$$f_1=\frac{1}{2\pi\sqrt{C_{AS}(M_{AD}+2M'_{A1})}} \qquad 8\text{-}11$$

حيث قد افترضنا أن المفاعلة الإشعاعية X_{AR} لكل جانب من جوانب الحجاب الحاجز تساوى $\omega M'_{A1}$ وأن $\omega M'_{A1}=0.27\rho_o/a$.

من الشكل 8-4 نرى أن تردد الرنين للسماعة في حاجز صندوق – مغلق حجمه أقل من 8 قدم[3] يكون على الصورة،

$$f_2=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C_{AS}+C_{AB}}{C_{AS}C_{AB}(M_{AD}+M_{A1}+M_{AB})}} \qquad 8\text{-}12$$

حيث C_{AB} و M_{AB} تعطى بالمعادلات 8-7 و8-8 و $M_{A1}\approx\dfrac{0.2\rho_o}{a}$.

النسبة بين المعادلة 8-12 إلى المعادلة 8-11 تساوى النسبة بين تردد الرنين مع الصندوق وتردد الرنين مع حاجز لانهائى.

تكون هذه النسبة على النحو،

$$\frac{f_2}{f_1}=\sqrt{\left(1+\frac{C_{AS}}{C_{AB}}\right)\left(1+\frac{1.25M'_{A1}-M'_{AB}}{M_{AD}+M_{A1}+M_{AB}}\right)} \qquad 8\text{-}13$$

إذا احتلت السماعة أقل من ثلث مساحة جانب الصندوق المعلقة فيه السماعة، تكون المعادلة 8-13 بالتقريب على الصورة،

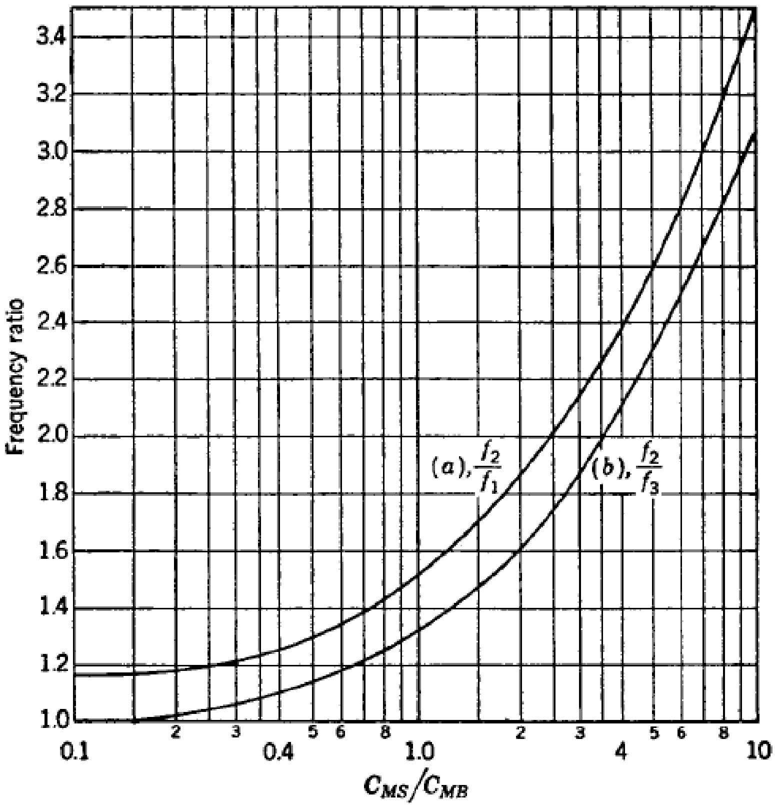
$$\frac{f_2}{f_1}=\sqrt{1.13\left(1+\frac{C_{AS}}{C_{AB}}\right)} \qquad \text{سلطان} 8\text{-}14$$

تم رسم هذه المعادلة في الشكل 8ـ11.

في معظم الأحيان، يكون من الصعب إيجاد حاجز " لانهائى " الذي يتم فيه تعيين تردد الرنين. إذا تم حمل السماعة في فضاء حر بدون حاجز، فإن تحميل الكتلة M''_{A1} على الحجاب سوف يكون نصف قيمته في حاجز لانهائي، بمعنى أن، $M''_{A1}=0.135\rho_o/a$. بالتالي، فإن النسبة بين تردد الرنين في الصندوق المغلق f_2 إلى تردد الرنين بدون حاجز f_3 تكون بالتقريب على الصورة،

$$\frac{f_2}{f_3}=\sqrt{0.87\left(1+\frac{C_{AS}}{C_{AB}}\right)} \qquad \text{سلطان} 8\text{-}15$$

تم رسم هذه المعادلة أيضا في الشكل 8ـ11.



الشكل 11.8 (أ) f_2/f_1 النسبة بين تردد رنين سماعة في حاجز صندوق – مغلق إلى تردد رنين لنفس السماعة في حاجز لانهائى. (ب) f_2/f_3 النسبة بين تردد رنين سماعة في حاجز صندوق – مغلق إلى تردد رنين لنفس السماعة بدون حاجز.

معادلة الإشعاع

عند التردد المنخفض جدا حيث لم يصبح الحجاب بعد مشعاع موجه (بمعنى، يقل محيطه عن طول الموجة تقريبا)، فإنه يمكن معالجة السماعة في حاجز صندوق – مغلق كما لو كانت مصدر كروي بسيط. نجد من المعادلة 3.4 أن ضغط الصوت عند نقطة في مجال حر تبعد مسافة r عن المصدر يعطى بالعادلة،

$$|p| \approx \frac{f\,\rho_o |U_c|}{2r} \qquad \text{سلطان } 8\text{-}16$$

حيث $[p]$ هو مقدار ج م م ضغط الصوت بالنيوتن لكل متر مربع عند المسافة r من السماعة، $[U_c]=[u_c]S_D$ هو مقدار ج م م السرعة الحجمية للحجاب بالمتر المكعب لكل ثانية، ρ_o كثافة الهواء بالكيلوجرام على المتر المكعب (1.18 كجم/م^3 عند ظروف الغرفة الطبيعية)، r المسافة من السماعة بالمتر (1 م =3.28 قدم)، و f التردد بالهيرتز.

عند الترددات المتوسطة، حيث يصبح الحجاب موجها لكن ما يزال يهتز بشكل أساسى كمكبس صلب، فإن الضغط عند مسافة r في مجال حر يكون على الصورة،

$$|p| \approx \sqrt{\frac{|U_c|^2\,\Re_{AR}\,Q\,\rho_o c}{4\pi r^2}} \qquad \text{سلطان } 8\text{-}17$$

حيث $\Re_{AR}$ هو مقاومة الإشعاع من الجانب الأمامي للحجاب بوحدات الأوم الميكانيكى في م كجم ث (أنظر المعادلة 4.8)، Q هو بالتقريب معامل التوجيهية لمكبس في نهاية أنبوبة (أنظر الشكل 20.4)، $\rho_o c$ هي المعاوقة المميزة للهواء بالرايليى في م كجم ث (حوالي 407 رايلى في ظروف الغرفة الطبيعية)، c سرعة الصوت بالمتر لكل ثانية (حوالى 344.8 م/ث في ظروف الغرفة الطبيعية).

عند الترددات المنخفضة، تختزل المعادلة 17.8 إلى المعادلة 16.8 لأن $Q \approx 1$ و $\Re_{AR} = \pi f^2 \rho_o / c$.

السرعة الحجمية للحجاب U_c

نعين السرعة الحجمية للحجاب U_c من الشكل 8ـ4 على الصورة،

$$|U_c| = \frac{e_g Bl}{S_D(R_g + R_E)\sqrt{R_A{}^2 + [\omega M_A - (1/\omega C_A)]^2}} \qquad \text{8-18}$$

حيث من الشكل 8ـ4 نحصل على،

$$R_A = \frac{B^2 l^2}{(R_g + R_E)S_D{}^2} + R_{AS} + R_{AB} + \Re_{AR} \qquad \text{8-19}$$

$$M_A = M_{AD} + M_{A1} + M_{AB} \qquad \text{8-20}$$

$$C_A = \frac{C_{AS}C_{AB}}{C_{AS} + C_{AB}} \qquad \text{8-21}$$

بشكل عام، تعطى كتلة الإشعاع والمقاومة $\Re_{AR}$ و M_{A1} بواسطة المعادلات 8ـ4 و8ـ5 لكن في حالة الصناديق الكبيرة جدا بحواجز لانهائية فإنها تعطى بالمعادلات 8ـ2 و8ـ3.

في محاولة تبسيط المعادلة 8ـ18، دعنا نعرف Q_T بنفس الأسلوب الذي نتبعه مع الدوائر الكهربية. دعنا نضع أولا،

$$\omega_o{}^2 \equiv \frac{1}{M_A C_A} \qquad \text{8-22}$$

حيث ω_o تردد الرنين الزاوي للمفاعلة الصفرية. حينئذ فإن،

$$Q_T \equiv \frac{\omega_o M_A}{R_A} \qquad \text{8-23}$$

و

$$\left(\omega M_A - \frac{1}{\omega C_A}\right)^2 = \omega_o{}^2 M_A{}^2 \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)^2 \qquad \text{8-24}$$

بالتعويض بالمعادلات من 8ـ22 إلى 8ـ24 في المعادلة 8ـ18 نحصل على

$$|U_c| = \frac{e_g Bl}{S_D(R_g + R_E)\omega_o M_A \sqrt{\frac{1}{Q_T^{\,2}} + \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)^2}} \qquad 8\text{-}25$$

عند تطبيع (تسوية) الطرف الأيمن من هذه المعادلة بحيث تصبح قيمته مساوية الوحدة عند $\omega = \omega_o$ ، نحصل على معادلة لمنحنيات الرنين العام التي منها يمكن الحصول على منحنى الرنين المضبوط بدون حسابات عندما تكون Q_T معلومة.[4]

السرعة الحجمية المرجعية وضغط الصوت

بشكل اختياري، تعرف السرعة الحجمية المرجعية لحجاب هنا بالمعادلة،

$$|U_c|c = \frac{e_g Bl}{(R_g + R_E)\omega M_A S_D} \qquad 8\text{-}26$$

هذه السرعة الحجمية المرجعية تساوى السرعة الحجمية الفعلية فوق تردد الرنين تحت الظرف الخاص حيث يكون المقدار $R_A^{\,2}$ في المعادلة 8ـ19 صغيرا مقارنة مع $\omega^2 M_A^{\,2}$. تتفق هذه السرعة الحجمية المرجعية مع كفاءة القدرة المرجعية المتاحة المعرفة في الفصل 8ـ7.

يوجد ضغط الصوت المرجعى عند الترددات المنخفضة، حيث يمكن افتراض أنه يوجد معامل توجيهية يساوى الوحدة، من المعادلات 8ـ16 و8ـ26.

$$|pc| = \frac{e_g Bl\,\rho_o}{(R_g + R_E) M_g 4\pi r S_D} \qquad 8\text{-}27$$

سلطان

(المعادلة 8ـ27 هي نفس المعادلة المشتقة في المثال 7ـ1 ماعدا المعامل 2 في المقام. هذا المعامل 2 يعبر عن الفرق بين الإشعاع إلى كامل الفضاء كما هو مقارن مع الإشعاع إلى نصف الفضاء، أى حالة حاجز لانهائى.)

من المؤكد أن ضغط الصوت المرجعى سوف لا يكون ضغط الصوت الفعلى في المنطقة فوق تردد الرنين مالم تكون حركة الحجاب محكومة – بالكتلة ومالم يكون معامل التوجيهية قريب من الوحدة. لكن، يكون الضغط المرجعى طريقة سهلة لوضع " الصفر " ديسيبل على منحنى

استجابة مستوى – ضغط – الصوت، وهذا هو السبب لتعريفه هنا.

ضغط الصوت المشع عند $ka < 1$

يمكن إيجاد ضغط الصوت المشع في منطقة التردد حيث يكون محيط الحجاب ($2\pi a$) أقل من الطول الموجي (أي، حيث تكون التوجيهية مهملة) بأخذ النسبة بين المعادلة 8ـ16 والمعادلة 8ـ27 باستخدام المعادلة 8ـ25 لـ $|U_c|$.

$$\left|\frac{p}{pc}\right| = \frac{\omega/\omega_o}{\left[\frac{1}{Q_T^{\,2}} + \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)^2\right]^{1/2}} \qquad \text{8-28}$$ سلطان

تكون النسبة، بالديسيبل، لضغط الصوت عند تردد الرنين ω_o إلى ضغط الصوت المرجعي على الصورة،

$$20\log_{10}\left|\frac{p}{pc}\right|_o = 20\log_{10} Q_T \qquad \text{8-29}$$ سلطان

في حالة الاستجابة المستوية أسفل حتى أقل تردد ممكن، فإن Q_T يجب بالتقريب أن تساوى الوحدة. (لاحظ أنه بالنسبة للتخميد الحرج فإن $Q_T = 0.5$).

بالرجوع إلى المعادلة 7ـ39، نجد أننا اقترحنا للاستجابة العابرة المقنعة أن $R_M / M_M = R_A / M_A > 184\sec^{-1}$. دعنا نرى ماذا يعنى هذا بدلالة Q_T .

بدلالة Q_T يكون المعيار المقترح للاستجابة العابرة المقبولة هو،

$$Q_T = \frac{\omega_o M_A}{R_A} < \frac{\omega_o}{184} \qquad \text{8-30}$$ سلطان

كمثال، إذا كان $\omega_o = 2\pi f_o = 2\pi\, 40 = 250$ radians/sec ، حينئذ Q_T يجب أن تكون أقل من 1.36 . سوف يعنى هذا أن القمة في منحنى الاستجابة يجب أن تكون أقل من 3 ديسيبل.

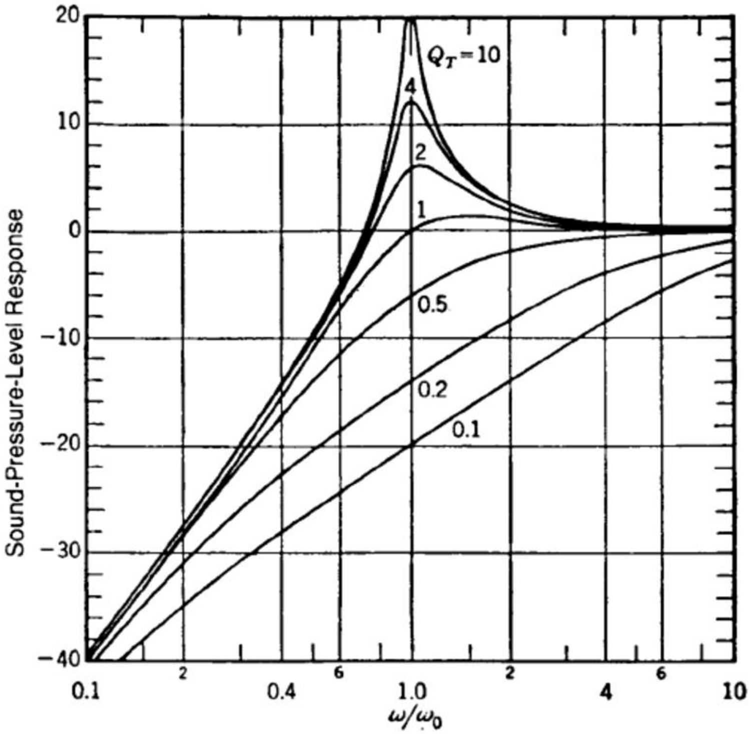
سوف يتم مناقشة طرق تحقيق قيم Q_T المرغوبة كجزء في المثال التالي.

لتسهيل تصميم سماعات المشعاع – المباشر، تعطى المعادلة 8ـ28 بوحدات الديسيبل بواسطة المعادلة 8ـ31 التالية،

$$20\log_{10}\left|\frac{p}{\rho c}\right|_o = 20\log_{10}\frac{\omega}{\omega_o} - 10\log_{10}\left[\frac{1}{Q_T^{\,2}} + \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)^2\right] \quad \text{db} \qquad 8\text{-}31$$

سلطان

تم رسم المعادلة 8ـ31 في الشكل 8ـ12. يجب تذكر أن المعادلات 8ـ31 حتى 8ـ33 والشكل 8ـ12 تصلح سواء في حالة الصندوق المغلق الصغير أو في حالة الحاجز اللانهائى، وهذا يعتمد على كيفية اختيار $\Re_{AR}$ و M_{A1}.



الشكل 8ـ12 استجابة مستوى – ضغط – الصوت لسماعة بمشعاع – مباشر عند الترددات المنخفضة. تم افتراض حاجز لانهائي أو وعاء صندوق – مغلق. يشير الديسيبل الصفرى إلى ضغط الصوت المعرف بالمعادلة 8ـ27. Q_T هي كما في المعادلة 8ـ23 و ω_o توجد من المعادلة 8ـ22. يطبق المنحنى فقط على مدى التردد حيث تكون الأطوال الموجية أكبر من ثلاثة أمثال قطر الحجاب المعلن تقريبا.

يجب ملاحظة أنه، حتى في مدى التردد حيث يكون قطر الحجاب أقل من ثلث الطول الموجي، فإن قيمة Q_T لا تكون ثابتة بشكل صارم لأن $\Re_{AR}$ تزداد مع مربع التردد. باستعمال المعادلة 8ـ31

والشكل 8ـ12، لذلك فإن R_A في Q_T ربما يجب أن تحسب كدالة في ω/ω_o. لكن، في العادة تكون قيمة R_A عند ω_o الحالة الوحيدة التي تكون الحسابات لها ضرورية.

ضغط الصوت المشع عند الترددات المتوسطة والعالية

عندما يصبح التردد كبير بشكل كافي بحيث يكون قطر الحجاب أكبر من ثلث طول الموجة، فإن المعادلة 8ـ28 قد لم تعد مستعملة. إذا كان الحجاب ما يزال يهتز كمكبس صلب، يمكننا إيجاد النسبة بين $|p|$ و $|pc|$ بأخذ النسبة بين المعادلة 8ـ17 والمعادلة 8ـ27، باستخدام المعادلة 8ـ25 لـ $|U_c|$ وافتراض أننا نكون فوق تردد الرنين الأول بالتالي $\omega/\omega_o >> \omega_o/\omega$. هذه العملية تعطي،

$$\left|\frac{p}{pc}\right| = \sqrt{\frac{4\Re_{AR}\,Q\,c\pi}{\rho_o(R_A{}^2/M_A{}^2+\omega^2)}} \qquad \text{8-32}$$

حيث ω_o تعطى في المعادلة 8ـ22 و

$$M_A = M_{AD} + \frac{2X_{AR}}{\omega} \qquad \text{8-33}$$

سلطان

$$R_M = \frac{B^2l^2}{(R_g+R_E)S_D{}^2} + R_{AS} + 2\Re_{AR} \qquad \text{8-34}$$

حيث Q دليل التوجيهية لمكبس في نهاية أنبوبة (أنظر الشكل 4ـ20). تصبح المعادلة 8ـ32 معبر عنها بوحدات الديسيبل على الصورة،

$$20\log_{10}\left|\frac{p}{p_c}\right| = 10\log_{10}\Re_{AR} + \text{DI} + 10\log_{10}\frac{4\pi c}{\rho_o} - 10\log_{10}\left(\frac{R_A{}^2}{M_A{}^2}+\omega^2\right) \qquad \text{8-35}$$

حيث $\text{DI} = 10\log_{10} Q$ هو دليل التوجيهية لمكبس في نهاية أنبوبة طويلة (أنظر الشكل 4ـ20). $10\log_{10}\frac{4\pi c}{\rho_o} = 35.7$ db عند ظروف الغرفة الطبيعية.

يبين فحص المعادلة 8ـ35 أن استجابة ضغط – الصوت $|p|$ للسماعة منسوبة إلى إستجابتها المرجعية $|p_c|$ تكون دالة في التردد، نصف القطر الفعال للحجاب، وفي النسبة R_A / M_A .

لتبسيط التصميم تم رسم المعادلة 8ـ35 في الشكل 8ـ13 لأربعة قيم معلنة لأقطار سماعات لها أنصاف أقطار فعالة 0.0875، 0.11، 0.13، و0.16 متر على الترتيب. تنضم هذه المنحنيات إلى الشكل 8ـ12 عند الترددات حيث ω / ω_o تكون كبيرة مقارنة مع ω_o / ω .

8ـ6 موضع السماعة في الصندوق

يبين الشكل 8ـ7 نتائج مفاعلة صندوق مغلق مطبق على سماعة مثبتة في مركز وجه الصندوق الذي أبعاده تكون $L \times L$. موضع السماعة هذا يخلف شيئا يكون غير مرغوبا لأن الموجات التي تسافر نحو الخارج من الحجاب تصل الحواف الخارجية للصندوق في آن واحد ونتيجة للتراكب فإنه تتكون موجة مشتتة بشدة في الفضاء السمعى. لتقليل مقدار الموجة المشتتة يجب تحريك السماعة بعيدا عن المركز بعدة بوصات، ويفضل في اتجاه إحدى الزوايا.

لا يتطلب الأمر أن يكون الوجه الأمامي للصندوق في الشكل 8ـ2 مربع الشكل. من الممكن جعل نسبة الحافتين الأماميتين تتغير بين 1 و3 بدون تخريب صلاحية المخططات لنفس الحجم الكلى.

8ـ7 قياس ثوابت السماعة

لا يكون تعيين ثوابت السماعة صعبا إذا توفرت مقاييس الجهد المتردد والمستمر ومذبذب التردد-المتغير المعاير. أثناء الفحوصات يتم تعليق سماعات المشعاع – المباشر بدون حاجز في غرفة عديمة الصدى، أو في العراء، أو في حجرة كبيرة لها خاصية عدم الترداد. حينئذ، يمكن تعيين الثوابت المختلفة على النحو التالي:

1ـ قياس ω_o . يتم توصيل مصدر صوتى متغير – التردد له معاوقة خرج أكبر بمائة مرة من المعاوقة الأسمية للسماعة مع أطراف السماعة الصوتية. حينئذ، يتم توصيل الفولتميتر عبر الأطراف، وتغيير التردد حتى نحصل على أقصى قراءة للمقياس (أنظر الشكل 8ـ14). من

الشكل 2ـ7، نرى أن أقصى معاوقة كهربية للسماعة تقابل أقصى حركية ميكانيكية، والتي تحدث بدورها عند تردد الرنين f_o أو ω_o.

2ـ قياس R_E. يتم قياس المقاومة الكهربية لملف الصوت بواسطة قنطرة مقاومات مستمرة (dc).

3ـ قياس Q. تتعين Q للسماعة عن طريق تعيين عرض منحنى سرعة – الحجاب u_c المرسومة كدالة في التردد عند ثبوت التيار i (أنظر الشكل 8ـ14). بما أن $e = Blu_c$، يمكننا تعيين شكل منحنى السرعة برسم التردد مقابل الكمية

$$e = V_1 - E_E\, i = V_1 - \frac{E_E V_2}{E_g}$$

يقاس العرض Δf Hz بين النقط على المنحنى على جانبي قمة الرنين حيث يكون الجهد 3 ديسيبل (0.707) أسفل جهد القمة.

تعطى قيمة Q عند التيار الثابت بالعلاقة

$$Q = \frac{f_o}{\Delta f} \qquad 36\text{ـ}8$$

4ـ قياس M_{MD}. لإيجاد قيمة M_{MD}، يجب أن نعين الكتلة الكلية للحجاب، بما فيها حمل الهواء، ويطرح منها كتلة حمل – الهواء. تضاف كتلة معلومة إلى الحجاب، ويتم تعيين تردد الرنين الجديد. تكون الكتلة المضافة عادة قضيب رصاص أو قطعة من قصدير اللحام تلف على هيئة دائرة قطرها من 3 إلى 6 بوصة وتلبس على الحجاب بحيث لا تسقط وحدها. يستخدم الرصاص لأنه غير مغناطيسي.

إذا كان الرنين الأصلي هو ω_o وتردد الرنين بعد إضافة الكتلة M' kg هو ω'_o فإن

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{(M_{MD} + M_{M1})C_{MS}}} \qquad \text{سلطان } 8\text{-}37$$

و

$$\omega'_o = \frac{1}{\sqrt{(M_{MD} + M_{M1} + M')C_{MS}}}$$ 8-38سلطان

حيث C_{MS} المطاوعة الميكانيكية للتعليق بالمتر لكل نيوتن، $M_{M1} = 2.67a^3\rho_o = 3.15a^3$ هي كتلة حمل – الهواء بالكيلوجرام على جانبي الحجاب.

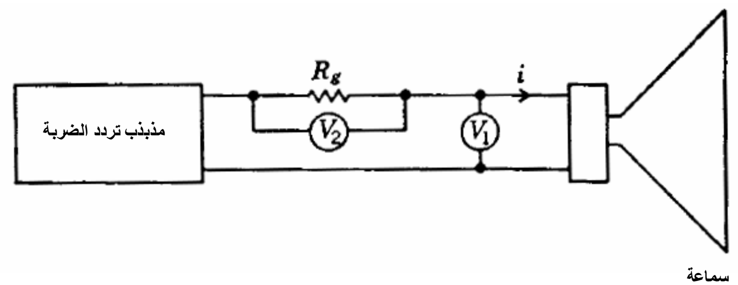
بحل المعادلتين 8ـ37 و8ـ38 أنيا نحصل على،

$$M_{MD} + M_{M1} = \frac{M'}{(\omega_o / \omega'_o)^2 - 1}$$ 8-39سلطان

5ـ تعيين R_{MS}. تتعين المقاومة الميكانيكية R_{MS} لتعليق الحجاب زائد مقاومة حمل – الهواء من البيانات السابقة. نعلم من نظرية الدائرة أن

$$R_{MS} + \Re_{MR} = \frac{\omega_o(M_{MD} + M_{M1})}{Q}$$ 8-40سلطان

حيث $\Re_{MR} = 0.1886a^6\rho_o\omega^4 / c^3 = (8.45\times10^{-6})a^6 f^4$ مقاومة حمل – الهواء الميكانيكية بوحدات الأوم الميكانيكي في م كجم ث لكلا جانبي السماعة بدون الحاجز. بشكل عام، يمكن إهمال هذه المقاومة.



الشكل 8ـ14 دائرة لتعيين تردد الرنين للسماعة. يتم البقاء على الجهد V_2 ثابت، وتغيير تردد المذبذب حتى يصل V_1 قيمة عظمى.

6ـ قياس C_{MS}. يمكن تعيين المطاوعة الميكانيكية للتعليق بإضافة كتلة معلومة إلى المخروط (البوق) وقياس الإزاحة المستمرة عندما يكون محور المخروط رأسيا. يتم تثبيت ميكروميتر عمق بشكل صلب بالنسبة لإطار السماعة لتحقيق ذلك. أي يمكن القول أن،

$$C_{MS} = \frac{\text{displacement (m)}}{\text{added wieght (newtons)}} \qquad 8\text{-}41$$

بالطبع، الوزن المضاف عبارة عن الكتلة المضافة بالكيلوجرام M' مضروبة في عجلة الجاذبية، أي أن

$$\text{Added force (weight)} = f_1 = M'g = 9.8M' \quad \text{newtons} \qquad 8\text{-}42$$

يمكن تعيين المطاوعة C_{MS} أيضا من المعادلة 8ـ37 إذا كانت الكتل $M_{\mathrm{MD}} + M_{\mathrm{M1}}$ وتردد الرنين الزاوى ω_o معلومة. في هذه الحالة لا حاجة لميكروميتر العمق.

7ـ قياس Bl. تتعين قيمة ثابت الاقتران الكهرومغناطيسى Bl باستخدام كتلة مضافة وميكروميتر العمق الموصوف أعلاه لتأشير المكان الأولى للحجاب. عند إضافة الكتلة M' للحجاب، تحدث إزاحة للحجاب إلى أسفل. لاستعادة الحجاب إلى موضعه الأصلى تلزم قوة ثابتة f_s.

عندما يمر تيار مستمر i خلال لفات ملف –الصوت بالمقدار والاتجاه الصحيح فإن القوة المطلوبة f_s سوف تتولد كما تبين العلاقة،

$$f_s = Bli \qquad 8\text{-}43$$ سلطان

تولدت إزاحة الحجاب بواسطة وزن الكتلة المضافة (انظر المعادلة 8ـ42). سوف يعود الحجاب إلى موضعه الصفرى عندما

$$f_1 = f_s \qquad 8\text{-}44$$

بحل المعادلات 8ـ42 و8ـ43 آنيا نحصل على

$$Bl = \frac{M'g}{i} = \frac{9.8M'}{i} \qquad 8\text{-}45$$ سلطان

8ـ قياس S_D يمكن تعيين المساحة الفعالة للحجاب فقط عن طريق ربط جانبه الأمامي مع صندوق مغلق. يجب تعيين حجم الهواء V_o المحبوس للفضاء المقترن بالحجاب وجوانب الصندوق بدقة عالية. حينئذ يتم توصيل مانومتر مائل إلى المجال الهوائى لقياس ضغط الهواء. حينئذ يتم

إزاحة المخروط لمسافة معلومة ξ متر، وتأخذ قراءة المانومتر، ويتم تعيين الضغط التزايدي p .
حينئذ،

$$p = \frac{P_o}{V_o} \xi S_D$$

أو

$$S_D = \frac{V_o}{P_o} \frac{p}{\xi} \quad \text{m}^2 \qquad \text{سلطان } 8\text{-}46$$

حيث P_o هو الضغط الجوى. يجب قياس كل من P_o و p بنفس الوحدات، ويجب تعيين V_o / ξ بالمتر المربع.

عادة، يمكن تعيين S_D بدقة كافية في معظم الحسابات من الأشكال 8ـ5أ، بمعنى أن $S_D = \pi a^2$.

8ـ8 قياس ثوابت الحاجز

يمكن قياس ثوابت الحاجز بعدما تكون ثوابت السماعة معلومة. ارجع إلى الشكل 8ـ4. يمكن تعيين الكميات $\Re_{AR}$ و X_{AR} من المعادلات 8ـ4 و8ـ5. تقاس الكميات الكهربية والميكانيكية مباشرة.

1ـ قياس X_{AB} . باستخدام نفس الطريقة مثل قياس ω_o في الفصل 8ـ7، يتم تعيين ω_o الجديدة والحل لـ X_{AB} من الشكل 8ـ4.

2ـ قياس R_{AB} . باستخدام نفس الطريقة مثل قياس Q في الفصل 8ـ7، يتم تعيين Q الجديدة والحل لـ R_{AB} من المعادلة،

$$R_{AB} = \frac{\omega_o (M_{AD} + M_{A1})}{Q} - (R_{AS} + \Re_{AS})$$

حيث $M_{AD} = M_{MD} / S_D^{\ 2}$ ، و M_{A1} تعطى بالمعادلة 8ـ5 و

$$R_{AS} + \Re_{AR} = \frac{R_{MS} + \Re_{MR}}{{S_D}^2}$$

المثال 8ـ1

بفرض سماعة بمشعاع – مباشر في حاجز لانهائي، عين Q_T و R_{MS} للسماعة المبينة بالشكل 7ـ8.

الحل

القطر المعلن لهذه السماعة هو 8 بوصة، ومن الشكل 8ـ5أ نجد أن هذا يقابل نصف قطر فعال للحجاب مقداره $a = 0.088\ \text{m}$ ومساحة فعالة مقدارها $S_D = 0.0244\ \text{m}^2$. بالتالي يكون الشكل 8ـ12 صالح لهذه السماعة للأطوال الموجية المنخفضة حتى 0.6 متر، أو التردد الأعلى حتى 550 هيرتز. يتوقف حجاب هذه السماعة عن الاهتزاز كمكبس صلب عند 400 هيرتز تقريبا وبذلك فإن النظرية والقياسات من المتوقع أن تتفق جيدا فقط إلى أعلى حتى 200 هيرتز.

بوضع (بتراكب) البيانات المقاسة المرسومة في الشكل 7ـ8 على المخططات في الشكل 8ـ12، نجد أن $Q_T \approx 6$. نلاحظ أيضا أن $\omega_o = 565\ \text{radians/sec}$.

من الشكل 8ـ5ج نجد أن $M_{AD} \approx 0.0042\ \text{kg}$ و

$$M_{AD} = \frac{0.0042}{(0.0244)^2} = 7.05\ \ \text{kg/m}^4$$ سلطان

السماعة كانت في حاجز لانهائي بالتالي من المعادلة 8ـ3 نجد

$$2M_{A1} = \frac{(2)(0.27)(1.18)}{0.088} = 7.25\ \ \text{kg/m}^4$$

بالتالي

$$M_A = M_{AD} + 2M_{A1} = 14.3\ \ \text{kg/m}^4$$

من المعادلة 8ـ23 نحصل على

$$R_A = \frac{\omega_o M_A}{Q_T} = \frac{(565)(14.3)}{6} = 1346 \text{ mks acoustic ohms}$$

المقاومة الإشعاعية $2\Re_{AR}$ عند $\omega_o = 565 \text{ radians/sec}$ ($f_o = 90\text{Hz}$) يجب أن تساوي (انظر المعادلة 8ـ2)،

$$2\Re_{AR} = (2)(0.0215)(90)^2 = 348 \text{ mks acoustic ohms}$$

يكون التخميد المساهم بواسطة التعليق عند تردد الرنين على النحو،

$$R_{AS} = R_A - 2\Re_{AR} = \frac{B^2 l^2}{(R_g + R_E) S_D{}^2}$$

من الجدول 8ـ1 كانت R_E تساوي 3 أوم تقريبا. تم تشغيل السماعة على مكبر له مقاومة خرج مقدارها 12 أوم، و Bl كانت 2.5 ويبر/م تقريبا. لذلك،

$$\frac{B^2 l^2}{(R_g + R_E) S_D{}^2} = \frac{6.25}{(15)(0.0244)^2} = 700 \text{ mks acoustic ohms}$$

بالتالي،

$$R_{AS} = 1346 - 348 - 700 = 298 \text{ mks acoustic ohms}$$

من الشيق ملاحظة أن Q_T تكون دالة في التردد لأن R_A تساوي

$$R_A = 298 + 730 + 0.043 f_o{}^2$$

على سبيل المثال، Q_T عند 300 هيرتز تساوي

$$Q_T = \frac{\omega_o M_A}{R_A} = \frac{(565)(14.3)}{5000} = 1.62$$

بالرجوع إلى الشكل 8ـ12 يتبين أن الاستجابة عند 300 هيرتز تكون في الأساس بالنسبة لـ $Q_T = 1.62$ كما في حالة قيمتها 6 عند 90 هيرتز.

المثال 2.8

بفرض سماعة مدى – تردد – واسع، وأن السماعة مصممة لتعمل بدون وحدة صوت عالى الذبذبة (تويتر، tweeter unit)، ولها قطر أسمى 12 بوصة، وأن الثوابت الفيزيائية تكون على النحو المعطى أدناه:

سلطان

$$
\begin{aligned}
a &= 13 \text{ cm (effective radius)} \\
C_{MS} &= 2 \times 10^{-4} \text{ m/newton} \\
M_{MD} &= 12 \text{ g} \\
R_g &= 2 \text{ ohms} \\
R_E &= 8 \text{ ohms} \\
B &= 1 \text{ weber/m}^2 \\
l &= 10 \text{ m} \\
R_{MS} &= 1 \text{ newton-sec/m} \\
S_D &= \pi a^2 = 0.053 \text{ m}^2 \\
S_D^2 &= 0.00281 \text{ m}^4
\end{aligned}
$$

(أ) عين النسبة المئوية للإزاحة في تردد الرنين الأول للسماعة عن القيمة في حالة حاجز لانهائى إذا تم استخدام صندوق له الأبعاد $1.732 \times 1.732 \times 1 = 3 \text{ ft}^3$.

(ب) عين ارتفاع قمة الرنين، بفرض ان $R_{AB} = 0$.

(ج) عين الأبعاد للحاجز من النوع المبين في الشكل 9ـ8 الذي سوف يسبب إزاحة في تردد رنين الحاجزـ اللانهائى فقط بمقدار 10٪.

(د) عين ارتفاع قمة الرنين للحاجز المعطى في (ج).

الحل

(أ) أولا، دعنا نعين قيمة الكتل الإشعاعية –الصوتية للسماعة في حاجز لانهائى. من المعادلة 2ـ8 نحصل على،

$$2M_{A1} \approx \frac{0.54\rho_o}{a} = \frac{(0.54)(1.18)}{0.13} = 4.9 \text{ kg/m}^4$$

أيضا،

$$C_{AS} = C_{MS}S_D^2 = (2\times 10^{-4})(2.81\times 10^{-3})$$
$$= 5.62\times 10^{-7}\ \text{m}^5/\text{newton}$$
$$M_{AD} = \frac{M_{MD}}{S_D^2} = \frac{0.012}{0.00281} = 4.26\ \text{kg/m}^4$$

يمكن إيجاد تردد الرنين للسماعة في حاجز لانهائى من المعادلة 11.8،

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{5.62\times 10^{-7}(4.9+4.26)}} = \frac{10^2}{6.28\sqrt{0.0516}} \approx 70\text{Hz}$$

من المعادلة 7.8 نجد علاقة للكمية C_{AB} على النحو،

$$C_{AB} = \frac{V}{\gamma P_o} = \frac{(3)(2.832\times 10^{-2})}{1.4\times 10^5} \approx 6.06\times 10^{-7}\ \text{m}^5/\text{newton}$$

تكون نسبة C_{AS} إلى C_{AB} هى

$$\frac{C_{AS}}{C_{AB}} = \frac{5.62\times 10^{-7}}{6.06\times 10^{-7}} = 0.93$$

من الشكل 11.8 نجد نسبة تردد الرنين مع حاجز صندوق – مغلق إلى تردد الرنين في حاجز لانهائى.

$$\frac{f_2}{f_1} = 1.48$$

أى أن، تردد الرنين الجديد يكون 48٪ أعلى، وبالتالي،

$$f_2 = (1.48)(70) = 103.5\ \text{Hz}$$

(ب) يتم إيجاد ارتفاع قمة الرنين من المعادلات 23.8 و29.8. تعطى المقاومة الكلية R_M بالمعادلة 19.8 للترددات المنخفضة. باستخدام المعادلة 4.8 و $f_o = 103.5\ \text{Hz}$ ، نعين المقاومة الإشعاعية عند تردد الرنين.

$$\Re_{AB} = 0.01076 f^2 = (0.01076)(103.5)^2 = 115\ \text{mks acousticohms}$$

$$R_{AS} = \frac{R_{MS}}{S_D^{\ 2}} = \frac{1}{0.00281} = 356\ \text{mks acousticohms}$$

لهذا فإن

$$R_A = \frac{10^2}{(10)(0.00281)} + 356 + 115 = 4030 \text{ mks acousticohms}$$

تعطى قيمة M_A بالمعادلة 8ـ20. كم المعادلة 8ـ5 نحصل على

$$M_{A1} \approx \frac{0.1952\rho_o}{a} = \frac{(0.1952)(1.18)}{0.13} = 1.772 \text{ kg/m}^4$$

من المعادلة 8ـ8 نحصل على،

$$M_{AB} = \frac{(0.85)(1.18)}{(3.14)(0.13)} = 2.46 \text{ kg/m}^4$$

لهذا،

$$M_A = 4.26 + 2.46 + 1.77 = 8.49 \text{ kg/m}^4$$

$$Q_T = \frac{\omega_o M_A}{R_A} = \frac{(650)(8.49)}{4030} \approx 1.37$$

$$20\log_{10}\frac{p}{pc} = 20\log_{10}1.37 \approx 2.7 \text{ db}$$

تقع قمة الرنين فوق مستوى الضغط المرجعي بمقدار 3 ديسيبل تقريبا. بسبب أن Q_T أكبر من الوحدة، فإن الضغط المرجعي يكون هو الضغط في المنطقة المستوية C فوق تردد الرنين، كما سنرى من الشكل 8ـ12.

(ج) عند 10٪ فقط إزاحة في تردد الرنين فإن، $f_2 = 70 \times 1.1 = 77$ Hz . من المعادلة 8.14 نجد أن،

$$\frac{C_{AS}}{C_{AB}} = \frac{(1.1)^2}{1.13} - 1 = 0.07$$

أو

$$C_{AB} = \frac{5.62\times10^{-7}}{0.07} = 8.04\times10^{-6}$$

لتحقيق هذه النسبة، فإن الصندوق إما يجب أن يكون كبيرا نسبيا، أو في غير ذلك، يجب علينا استخدام الترتيب المبين في الشكل 8-9 كما تساءلنا في نص المسألة. المفاعلة المطبعة المرغوبة تكون،

$$\frac{X_{AB}S_D}{\rho_o c} = \frac{-S_D}{\omega C_{AB}\,\rho_o c} = \frac{-(10^6\times0.053)}{484\times8.04\times407} = -0.0334$$

من الشكل 8-10 نرى أن لهذا النوع من الحواجز يلزم طول رأسى

$$L = 0.2\lambda = \frac{0.2\times344.8}{77} = 0.9\,\text{m, or 35 in}$$

عند ضبط السماعة ذات العرض 12 بوصة على مساحة المقطع العرضى 0.053 م^2، فإن الجانب الذي تثبت فيه سوف يكون ذى عرض مقداره 13 بوصة أى 0.33 متر. هذا يعطينا عرض الجانب الأخر $0.053/0.33 = 0.16\,\text{m} \approx 6.34\,\text{in}$.

(د) يوجد ارتفاع قمة الرنين من Q_T. لتعيين Q_T، نحتاج R_A و X_A.

$$R_A = 4030 + R_{AB}$$

نجد R_{AB} من الشكل 8-10.

$$R_{AB} = \frac{\rho_o c(0.25)}{S_D} = \frac{(410)(0.25)}{0.053} = 1935\ \text{mks acousticohms}$$

وهذا يعطى،

$$R_A = 4030 + 1935 \approx 6000\,\text{mks acousticohms}$$

$$M_A = 4.26 + 1.77 + 0 = 6.03\,\text{kg}$$

$$Q_T = \frac{\omega_o W_A}{R_A} = \frac{(484)(6.72)}{6000} \approx 0.54$$

بمعنى أخر يكون هذا الترتيب مضمحلا بشكل حرج تقريبا. عند 77 هيرتز سوف تنخفض

الاستجابة بحوالى 5 ديسيبل عن الاستجابة المرجعية.

المثال 3.8

سماعة تردد – منخفض (ووفير woofer). الكثير من أنظمة الصوت العالية – الجودة تستخدم سماعتين. سماعة تغطى مدى التردد ـ المنخفض، والأخرى تغطى التردد – العالى. يتم استخدام شبكة كهربية لتقسيم طاقة الخرج من المكبر إلى منطقتين من التردد تتمركزتان عند تردد العبور. ترددات العبور الشائعة هي 500، 800، 1000، و1500 هيرتز.

في هذا المثال، تم اختيار وحدة تردد – منخفض تجارية 15 ـ بوصة، مصممة للاستخدام مع شبكة عبور 500 هيرتز. ونظرا لعدم توفر المعلومات من المصنع حول ثوابت هذه السماعة، فإنه يتم تعيينها عمليا. لذلك تم وضع السماعة في حاجز صندوق – مغلق، وتم قياس استجابة التردد لها، لمقارنتها مع الحسابات. هنا سوف نصف الطريقة الكاملة المستخدمة في تنفيذ التجارب، كما سوف يتم مقارنة النتائج مع الحسابات لكي يحصل القارئ على دليل لمصداقية الطريقة.

وضعت السماعة في صندوق مغلق له الأبعاد

$$V = (30\text{ in.} \times 35\text{in.} \times 18\text{in.})(1.639 \times 10^{-5}) = 0.31\ \text{m}^3$$

الثوابت الأخرى تم تعيينها بالطرق الموصوفة في الفصل 7.8.

$$\begin{aligned}
R_E &= 5.5 \text{ ohms}\\
C_{MS} &= 2.82 \times 10^{-4} \text{ m/newton}\\
a &= 0.16 \text{ m}\\
S_D &= 8.03 \times 10^{-2} \text{ m}^2\\
S_D{}^2 &= 6.45 \times 10^{-3} \text{ m}^4\\
R_{MS} &= 2.3 \text{ mks mechanical ohms}\\
M_{MD} &= 0.045 \text{ kg}\\
f_0 &= 39 \text{ cps}\\
\omega_0 &= 247 \text{ radians/sec}\\
Bl &= 25 \text{ webers/m}
\end{aligned}$$

سلطان

حجم الصندوق المشغول بالسماعة كان في حدود 0.01 م^2، بالتالي فإن،

$$V_B = 0.3\ \text{m}^3$$

نعين من هذه الكميات حجوم العناصر المبينة في الشكل 4.8،

$$C_{AS} = C_{MS}S_D^2 = 1.82 \times 10^{-6} \text{ m}^5/\text{newton}$$
$$R_{AS} = \frac{R_{MS}}{S_D^2} = 356 \text{ mks acoustic ohms}$$
$$M_{AD} = \frac{M_{MD}}{S_D^2} = 6.98 \text{ kg/m}^4$$
$$\frac{B^2l^2}{S_D^2} = 9.7 \times 10^4 \text{ webers}^2/\text{m}^6$$

تم وضع بطانية من مادة ممتصة سمكها 3 بوصة لها مقاومة تدفق 2000 رايليى في م كجم ث لكل بوصة من السمك على حائط الصندوق الذي أبعاده $18 \text{ in.} \times 35\text{in.}$ لتخفيض تأثيرات الموجات الموقوفة عند الترددات العالية. هذه المادة تعطى قيمة لـ R_{AB} تتغير بين القيم المعطاة بالمعادلة 8ـ10 عند الترددات المنخفضة إلى $\Re_{AB}$ للحاجز اللانهائي عند 500 هيرتز. إذا كانت مقاومة المكبر صغيرة فإن R_{AB} يمكن إهمالها عند الترددات المنخفضة.

تم بيان قيم R_{AB} المحسوبة من المعادلة 8ـ10 عند الترددات المنخفضة والمقدرة عند الترددات الأعلى في الجدول 8ـ2. عند الترددات المنخفضة جدا، 40 هيرتز مثلا، يمتص صندوق الخشب الحبيبى الصوت بسبب الفقودات الاحتكاكية في الخشب عند اهتزازه. على سبيل المثال، عند 40 هيرتز، من المتوقع أن يمتص الصندوق بقدر نصف الطاقة للقدم المربع التي تمتصها المادة السمعية الموضوع بالداخل. لكن، عند 80 هيرتز، سوف تمتص المادة الصوتية أكثر بكثير من الصندوق. بالتالي، في حالة الصندوق المغلق يمكننا إهمال الفقودات في الخشب عند تردد الرنين (بالقرب من 50 هيرتز)، حيث يمكننا التقدير بالحسابات التأثير بمضاعفة ثلاث مرات الكمية الفعلية للمادة.

توجد الكميات $\Re_{AB}$ و M_{A1} (أنظر الشكل 8ـ4) من الشكل 5ـ7، أو في حالة $ka<1$ من المعادلات 8ـ4 و8ـ5.

توجد الكمية M_{AB} في حالة $ka<1$ من المعادلة 8ـ8 والشكل 8ـ6. في حالة صندوقنا، فإن الكمية $S_D/L^2 = 0.0803/0.618 = 0.118$. من الشكل 8ـ6 نرى أن $B = 0.788$. قيمة M_{AB} في حالة $ka>1$ تساوى $0.92\rho_o c/S_D\omega$ مضروبة في المحور الرأسى للشكل 5ـ3.

تعيين R_A ، M_A ، و C_A . تعطى هذه الكميات بالمعادلات 19.8 حتى 21.8. في هذا المثال، تم تدوين القيم المحسوبة R_A و M_A في الجداول 2.8 و3.8 على الترتيب. توجد C_A كما يلي:

$$C_{AB} = \frac{V}{\gamma P_o} = \frac{0.3}{1.4 \times 10^5} = 2.14 \times 10^{-6} \ \text{m}^5/\text{newton}$$

$$C_A = \frac{C_{AS} C_{AB}}{C_{AS} + C_{AB}} = \frac{1.82 \times 2.14 \times 10^{-12}}{(1.82 + 2.14) \times 10^{-6}} = 9.84 \times 10^{-7} \ \text{m}^5/\text{newton}$$

الجدول 2.8 تعيين R_A

f, cps	ka	R_{AS}	$\Re_{AR}$*	R_{AB}	R_g = 3 ohms: $\frac{B^2l^2}{(R_g+R_E)S_D^2}$	R_g = 3 ohms: R_A	R_g = 130 ohms: $\frac{B^2l^2}{(R_g+R_E)S_D^2}$	R_g = 130 ohms: R_A
	$ka < 1$:							
20	0.0582	356	4	300	11,400	12,000	716	1380
100	0.291	356	108	93	11,400	12,000	716	1270
150	0.437	356	242	155	11,400	12,100	716	1470
200	0.582	356	430	295	11,400	12,500	716	1800
250	0.728	356	672	465	11,400	12,900	716	2210
300	0.874	356	968	775	11,400	13,500	716	2820
	$ka > 1$:							
400	1.164	356	1622	1470	11,400	14,800	716	4160
500	1.455	356	2640	2640	11,400	17,000	716	6350

* عند $ka < a$ ، $\Re_{AB} = 0.01076 f^2$

تعيين ω_o مع الصندوق. قيمة ω_o مع وعاء الصندوق – المغلق يكون، من الجدول 2.8 و C_A المعطاة من قبل، على الصورة،

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{M_A C_A}} = \frac{10^4}{\sqrt{(10.27)(0.984)}} = 318 \ \text{radian/sec}$$

أو

$$f_o \approx 50 \ \text{Hz}$$

تعيين Q_T.

$$Q_T = \frac{\omega_o M_A}{R_A} = \frac{318 M_A}{R_A}$$

تم تدوين قيم Q_T ، M_A / R_A (عند $f > 150\text{Hz}$)، و ω / ω_o في الجدول 8ـ3. أيضا يتبين في الجدول 8ـ3 قيم دليل التوجيهية كما هي معينة من الشكل 4ـ20 لمكبس في أنبوبة طويلة.

حساب منحنى استجابة – التردد

تسمح بيانات الجدول 8ـ3 بحساب منحنى استجابة مستوى – الصوت – النسبي لميكروفون موضوع على المحور الرئيسي لسماعة صوتية. يستخدم الشكل 8ـ12 لمدى التردد أسفل 150 هيرتز والشكل 8ـ13 للتردد 200 هيرتز فأعلى. يبين الشكل 8ـ15 نتائج الحسابات. يبين الشكل أيضا الحسابات في حالة المقاومات المتوسطة. تقابل قيمة $R_g = 3\text{ohms}$ جهد ثابت عبر الأطراف. $R_g = 14\,\text{ohms}$ تساوى المعاوقة الأسمية للسماعة. $R_g = 30$ ohms تكافئ تغير Bl بمعامل 0.5. $R_g = 130$ ohms تكافئ تغير Bl بمعامل 5.

الجدول 8ـ3 تعيين M_A ، Q_T ، و M_A / R_A.

f	20–150 cps	200	250	300	400	500
ka	0.0582–0.436	0.582	0.727	0.873	1.164	1.455
M_{AD}	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
M_{AB}	1.85	1.85	1.85	1.85	1.29	1.03
M_{A1}	1.44	1.44	1.44	1.44	1.27	1.02
M_A	10.27	10.27	10.27	10.27	9.54	9.03
R_g	Q_T	M_A/R_A				
3	0.27	8.2×10^{-4}	8×10^{-4}	7.6×10^{-4}	7×10^{-4}	6×10^{-4}
130	2.5	5.7×10^{-3}	4.6×10^{-3}	3.6×10^{-3}	2.5×10^{-3}	1.6×10^{-3}
ω/ω_0	0.4–3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0
DI, db	0–0.9	1.4	1.9	2.4	3.4	4.6

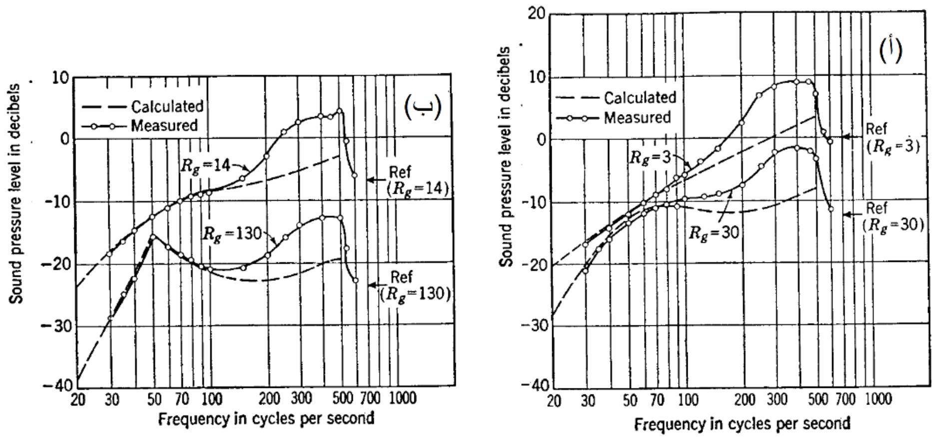
لكل منحنى ضغطه المرجعي الخاص به. لكن، لبيان التأثير على المستوى النسبي لمنحنى الاستجابة (عند ثبات e_g) عند تغيير معاوقة المكبر R_g، فإن الضغوط المرجعية (بالديسيبل) تنزاح بالنسبة لبعضهما البعض بواسطة العلاقة

$$(\text{Reference1} - \text{Reference2}) = 20\log_{10}\frac{R_{g2}+R_E}{R_{g1}+R_E} \quad \text{db}$$

عندما تراد استجابة كفاءة – القدرة – المتاحة (PAE)، نطرح دليل التوجيهية (DI) للجدول 2.8 من منحنيات الاستجابة المحسوبة للشكل 13.8. هذا يعطي قطعة (جزء) من منحنى PAEdb.

<u>**منحنى استجابة – التردد المقاس.**</u>

تم قياس منحنى الاستجابة –التردد في غرفة عديمة الصدى بواسطة مكبر 3ـ أوم 50ـواط يعمل كمصدر. كانت القدرة المتاحة حوالي 1 وات. كانت النتائج مأخوذة عند مسافة تبعد عن المصدر 7 أقدام على المحور الرئيسي للسماعة. عندما يراد المجال – البعيد للسماعة يجب أن تكون المسافة أكبر من 7 أقدام، لكن حجم الحجرة الصغير عديمة الصدى يمنع هذا. تم أيضا إظهار بيانات قيم R_g عند 3، 14، 30، و130 أوم عند جعل قيمة جهد مكبر الدائرة – المفتوحة e_g ثابتا بدوائر والخطوط المتصلة في الشكل 15.8.



الشكل 15.8 (أ) و(ب). منحنيات لمستوى ضغط الصوت المتولد على المحور بواسطة سماعة بمشعاع مباشر تردد – منخفض أسفل تردد رنين حافة الحجاب. المنحنيات المتقطعة هي القيم المحسوبة، بينما

المنحنيات المتصلة هي القيم المقاسة. تم رسم المنحنيات منسوبة إلى ضغط مرجعي عند $R_g = 3\text{ohms}$. الفروقات بين الحسابات والنتائج عند ترددات أعلى من 100 هيرتز تنتج عن رنين البوق (المخروط) يحدث تردد الحافة عند 500 هيرتز تقريبا.

التوافق بين النظرية والتجربة عند الترددات أسفل 100 هيرتز يكون ممتاز، وهذا يبين أن الحجاب كان يهتز كمكبس جاسئ. بين 100 و500 هيرتز تشع السماعة الصوت بشكل أكبر على طول المحور الرئيس كما تتوقع النظرية، بافتراض دليل توجيهية لمكبس 15-بوصة في أنبوبة طويلة.

تم أيضا عمل رسوم قطبية لضغط الصوت مع ميكروفون معلق في مكان ما والسماعة (والحاجز) تدور. تم مقارنة دليل التوجيهية المقاس مع الدليل النظرى في الجدول 8-4. تم أيضا مقارنة فروق معاملات التوجيهية مع الفروق بين المنحنيات النظرية والمقاسة في الشكل 8-15. تبين مقارنة هذه المنحنيات أنه ليس فقط السماعة كانت أكثر توجيهية من المتوقع لكنها أيضا تشع قدرة أكبر بالكمية المبينة في العمود الخامس. تم افتراض أن الزيادة في التوجيهية تكون نتيجة الشكل المخروطى للسماعة، بينما تعزى الزيادة في قدرة الخرج إلى تحول البوق إلى رنين من الرتب الأعلى. وجد أيضا فرق مماثل بين المنحنيات المقاسة والمحسوبة في حالة السماعة 8-بوصة المبين في الشكل 8-7.

الجدول 8-4 مقارنة قيم DI المقاسة لسماعة 15-بوصة في حاجز صندوق معلق مع القيم في حالة مكبس 15-بوصة في أنبوبة طويلة. أيضا تم عمل مقارنة DI مع الفروق بين المنحنيات المبينة في الشكل 8-15.

f	Directivity index, db		Differences in DI db	Differences from Fig. 8.15, db
	Loudspeaker	Piston		
100	0.8	0.4	0.4	0.6
200	3.0	1.4	1.6	4.0
300	5.5	2.4	3.1	8.0
400	8.0	3.4	4.6	8.0
500		4.6		

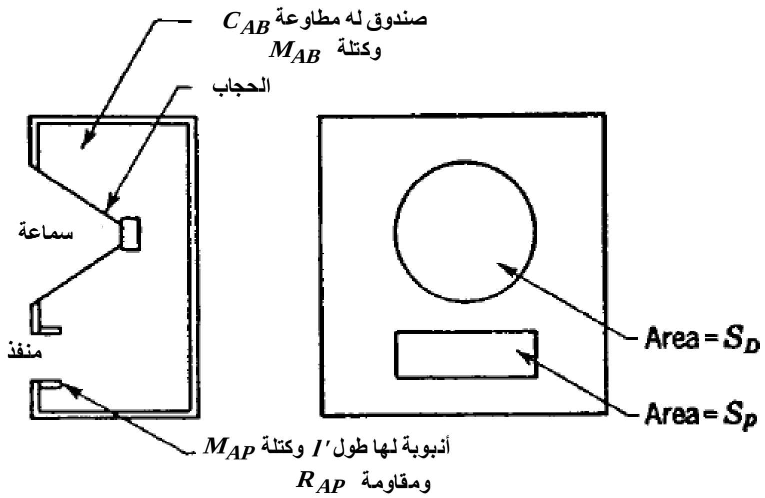
عند 500 هيرتز تقريبا، يحدث رنين الحافة السائد، مع انخفاض حاد متوقع في الاستجابة. بما أن السماعة لم تصمم لتعمل فوق 500 هيرتز، فإنه لم تؤخذ بيانات خلف هذه النقطة.

الجزء العشرون – أوعية انعكاس – الجهير BASS-REFLEX ENCLOSURES

9.8 وصف عام

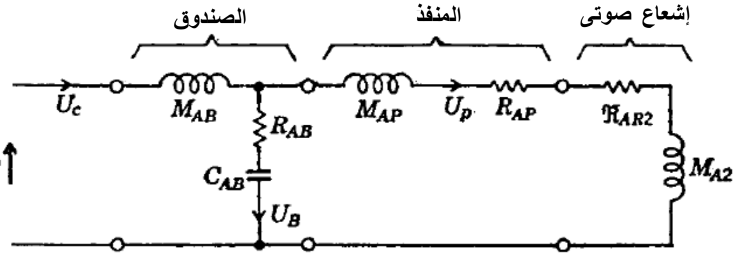
(انعكاس – الجهير هو انعكاس موجات الصوت باستخدام التمييز الترددى للصوت. المترجمون).

وعاء انعكاس – الجهير هو صندوق مغلق به فتحة، تسمى عادة المنفذ.[5-8] من الشائع أن مساحة المنفذ تصنع بحيث تكون مساوية أو أصغر من المساحة الفعالة لحجاب وحدة الدفع. يبين الشكل 16.8 التركيب الشائع لهذا النوع من السماعات. عندما يهتز الحجاب، فإن جزء من إزاحته تضغط الهواء داخل الصندوق والمتبقة من إزاحته يحرك الهواء نحو الخارج خلال المنفذ. هكذا فإن المنفذ يكون عبارة عن " حجاب " ثانى يدفع بواسطة الجانب الخلفي لحجاب السماعة. يكون المنفذ، عند الترددات المنخفضة، مكافئ لأنبوبة قصيرة الطول مع مفاعلة صوتية ومقاومة صوتية على التوالى. لهذه الأنبوبة تصحيح نهاية على الطرف الداخلى ومعاوقة إشعاعية على الطرف الخارجى، أو النهاية المشعة.



الشكل 16.8 حاجز انعكاس – الجهير. للمنفذ مساحة S_P ، وللحجاب مساحة S_D . مقدار M_{AP} يتضمن تصحيح النهاية للطرف الداخلى للأنبوبة.

سوف نفترض فيما تبقى من هذا التحليل أن $ka < 0.5$. بمعنى أننا سوف نقيد أنفسنا بمنطقة التردد المنخفض جدا حيث يكون الإشعاع من كل من المنفذ والسماعة غير موجها.



الشكل 17.8 دائرة صوتية مناظرة لصندوق سماعة بمنفذ. السرعة الحجمية للحجاب تكون U_c و للمنفذ U_p وللصندوق U_B.

10.8 الدائرة الصوتية

الدائرة الصوتية للصندوق والمنفذ تعطى في الشكل 17.8. مطاوعة ومقاومة الصندوق تكونا C_{AB} و R_{AB}. يكون تحميل الكتلة على الجانب الخلفي للحجاب هو M_{AB}. كتلة ومقاومة الهواء في المنفذ الذي يخترق جانب الصندوق، بما فيها تصحيح النهاية الداخلية هي M_{AP} و R_{AP} على الترتيب. أخيرا، كتلة ومقاومة إشعاع التوالى من الجانب الأمامي للمنفذ تكون M_{AR2} و $\Re_{AR2}$ على الترتيب. تكون قيم هذه الكميات M_{AB} كما في المعادلة 8.8، R_{AB} تكون كما في المعادلة 10.8، C_{AB} تكون كما في المعادلة 7.8، M_{A2} تكون كما في المعادلة 8-5، لكن مع a_2 بدلا من a ، بمعنى أن $M_{A2} = 0.23/a_2$، $\Re_{AR2}$ تكون كما في المعادلة 4.8 و $M_{AP} = (t + 0.6a_2)\rho_o / \pi a_2^{\ 2}$ هي الكتلة الصوتية للهواء في المنفذ بالكيلوجرام لكل متر[4]. تشمل هذه الكمية على تصحيح النهاية الداخلية. R_{AP} هي المقاومة الصوتية للهواء في المنفذ بالأوم الصوتي في م كجم ث. (أنظر المعادلة 5.54. أستخدم الرقم (1) بين الأقواس). ρ_o هي كثافة الهواء بالكيلوجرام للمتر المكعب (في الظروف الطبيعية تكون 1.18 كجم/م^3). a_2 نصف القطر الفعال للمنفذ (بالمتر) في الوعاء المفتوح. إذا كان المنفذ غير دائري، حينئذ دع $a_2 = \sqrt{S_p / \pi}$ ، حيث S_p المساحة الفعالة للفتحة بالمتر المربع. $S_p = \pi a_2^2$ هي المساحة الفعالة للفتحة بالمتر المربع. t طول الأنبوبة أو سمك جدار الوعاء الذي يتم فيه قطع المنفذ بالمتر.

في حالة أن المنفذ يحتوي على عدد من الفتحات أو الأنابيب الصغيرة المتماثلة، فإن الإجراء التالي

يتبع:

دع N يساوى عدد الفتحات في الوعاء. لكل فتحة تكون الكتلة والمقاومة الصوتية بما فيها M_{A2} و $\Re_{AR2}$ تكون على النحو: $M_A = (t+1.7a_3)\rho_o/(\pi a_3{}^2)$ بالكيلو جرام لكل متر^4 (أنظر المعادلة 5ـ57) و R_A المقاومة الصوتية لكل فتحة بوحدات الأوم الصوتى في مكجم ث (أنظر المعادلة 5ـ56)، و a_3 نصف القطر الفعال لكل فتحة بالمتر. تكون الكتلة والمقاومة الصوتية الكلية للعدد المتماثل N من الفتحات هي

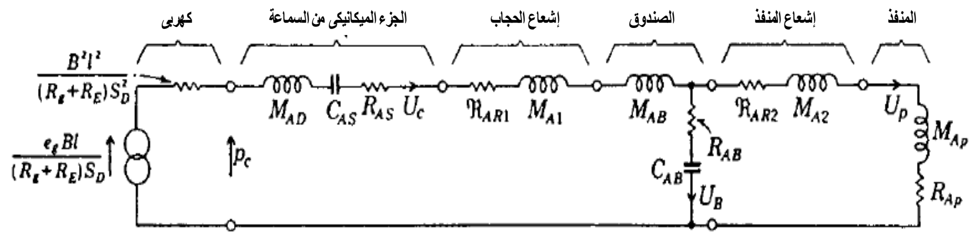
$$M_{A2} + M_{AP} = M_A / N \quad \text{kg/m}^4$$

$$\Re_{AR2} + R_{AP} = R_A / N \quad \text{mks acoustic ohms}$$

يكون معامل التوجيهية لمجموعة الفجوات مساويا تقريبا لنظيره في حالة مكبس له مساحة تساوى المساحة الموجودة داخل الخط الذي يحيط بكل مجموعة الفتحات.

11ـ8 الدائرة الكهروميكانوصوتية

يتم الحصول على الدائرة الكاملة للسماعة في وعاء من نوع انعكاس – الجهير بضم الأشكال 4ـ8 و17ـ8. لعمل ذلك، يزال جزء الدائرة المسمى "بالصندوق" في الشكل 4ـ8، ويتم استبدال الدائرة في الشكل 17ـ8 في مكانه. تكون الدائرة الناتجة كما هو مبين في الشكل 18ـ8.



الشكل 18ـ8 الدائرة الكاملة للسماعة في وعاء من نوع انعكاس – الجهير. تكون القوة الكلية المتولدة عند ملف الصوت بواسطة التيار الكهربي هي $p_c S_D$ ، حيث S_D مساحة الحجاب. تكون السرعة الحجمية هي U_c وللمنفذ تكون U_p . يفترض أن الصندوق غير مبطن. إذا كان الصندوق مبطن بمادة ممتصة للصوت، يجب إضافة مقاومة على التوالي مع M_{AB} . لاحظ أن تتضمن تحميل الكتلة الداخلية للمنفذ.

ملخص تصميم انعكاس الجهير

1- لتعيين حجم الصندوق ونوع المنفذ الداخل له:

(أ)أوجد قيم M_{MD} ، C_{MS} ، و S_D من الفصل 8ـ7. يمكن الحصول على قيم تقريبية من الشكل 8ـ5.

(ب)عين $M_{AD} = M_{MD} / S_D{}^2$ و $C_{AS} = C_{MS} S_D{}^2$.

(ج) اختر حجم صندوق الحاجز الذي تريده، بجعلة كبير بدرجة معقولة، إذا أمكن. أحسب C_{AB} من المعادلة 8ـ7.

(د) عين M_{AB} من المعادلة 8ـ8 واحسب $M_{A1} = 0.23/a$ ، حيث a نصف القطر الفعال للحجاب بالمتر.

(هـ) عين M_A من المعادلة 8ـ51 واحسب $M_{AT} = M_A C_{AS} / C_{AB}$. الكمية M_{AT} هي الكتلة الصوتية للمنفذ. إنها تتركب من جزئين M_{A2} و M_{AP} .

(و) قرر مساحة المنفذ. تتراوح مساحة المنفذ في العادة بين 0.5 و1.0 مثل S_D . احسب $M_{A2} = 0.23/a_2$ ، حيث a_2 نصف القطر الفعال للمنفذ بالمتر. إذا كان المنفذ غير مستدير فإن $a_2 = \sqrt{S_p} / \pi$ ، حيث S_D هي مساحة المنفذ بالمتر المربع. أطرح M_{A2} من M_{AT} لتحصل على M_{AP} .

(ز) عين الطول t للأنبوبة الذي يدخل من المنفذ، $t = 0.85 M_{AP} S_P - 0.6 a_2$.

(ح) أدرس الفصول 8ـ16 و8ـ17 للبناء والضبط والأداء.

2ـ لتعيين استجابة السماعة عند تردد أسفل رنين الحافة (500 هيرتز تقريبا):

(أ) أوجد حجوم العنصر للأشكال 8ـ18 و8ـ19 من النص.

(ب)عين ضغط الصوت المرجعي عند مسافة r من المعادلة 8ـ64.

(ج) عين قيم Q_1 ، Q_M ، و Q_2 من المعادلات 8ـ56 حتى 8ـ59 والنسبة C_{AS} / C_{AB} .

(د) عين استجابة ضغط الصوت بالديسيبل منسوب إلى ضغط صوت مرجعي عند الترددات الحرجة الثلاثة من الأشكال 8ـ22 حتى 8ـ24. توجد قيم التردد الحرجة من الأشكال 8ـ20 و8ـ21.

الكميات التي لم تدون في الفصل السابق تكون على النحو:

e_g جهد الدائرة – المفتوحة للمكبر الصوتي بالفولت، B كثافة الفيض في فجوة الهواء بالوبر

على المتر المربع، l طول سلك ملف الصوت بالمتر، R_g المقاومة الكهربية للخرج للمكبر الصوتى بالأوم، R_E المقاومة الكهربية لملف الصوت بالأوم، a نصف القطر الفعال للحجاب بالمتر، $M_{AD} = M_{MD} / S_D{}^2$ الكتلة الصوتية للحجاب وملف الصوت بالكيلوجرام/ متر^4. $C_{AS} = C_{MS} S_D{}^2$ هي المطاوعة الصوتية لتعليق الحجاب بالمتر^5 لكل نيوتن، $R_{AS} = R_{MS} / S_D{}^2$ المقاومة الصوتية لتعليق الحجاب بالأوم الصوتى في م كجم ث، M_{A1} كتلة الإشعاع الصوتى للجانب الأمامي لحجاب السماعة وتساوى $0.195\rho_o / a \text{ kg/m}^4$. لاحظ أننا نفترض وحدة السماعة تكافئ مكبس في نهاية أنبوبة. $\Re_{AR1} = 0.01076 f^2$ مقاومة الإشعاع –الصوتى للجانب الأمامي لحجاب السماعة بالأوم الصوتى في م كجم ث (أنظر الشكل 7.5 عند $ka > 1.0$).

إذا كان المنفذ مغلق بحيث إن السرعة الحجمية للهواء في المنفذ U_p تساوى صفر، حينئذ يتم إختزال الشكل 18.8 إلى الشكل 4.8. عند الترددات المنخفضة جدا فإن كتلة الهواء المتحركة خارجة من الفتحة السفلى تكون بالتقريب مساوية للكتلة المتحركة إلى الفتحة العليا عند كل اللحظات. بمعنى أنه عند الترددات المنخفضة جدا تكون السرعات الحجمية عند الفتحتين متساوية في المقدار وفي طور معاكس.

12.8 الصوت المشع

بشكل عام، يكون المنفذ في الصندوق ذى الحاجز العاكس – للجهير فعال فقط عند الترددات المنخفضة جدا. عند هذه الترددات تكون أبعاده صغيرة بشكل عام بحيث يمكن معالجته كما لو كان مصدر بسيط. يمكن معالجة حجاب السماعة أيضا كمصدر بسيط لأن مساحته تكون غالبا مثل مساحة الفتحة تقريبا.

بالرجوع للمعادلة 3.4، نجد أن ضغط الصوت عند مسافة r من سماعة عاكس – الجهير يكون على الصورة،.

$$p = p_1 + p_2 \approx \frac{jf\rho_o}{2r}(U_c e^{-jkr_1} - U_p e^{-jkr_2}) \qquad \text{8-47سلطان}$$

حيث p_1 و p_2 هي ج م م ضغوط الصوت المركبة على الترتيب، من الحجاب ومن المنفذ عند مسافة r ، حيث r هي متوسط مسافة نقطة الملاحظة من الحجاب والمنفذ. لاحظ أن r تكون كبيرة مقارنة مع أنصاف أقطار الحجاب والمنفذ. r_1 و r_2 المسافات الفعلية لنقطة الملاحظة من الحجاب والمنفذ على الترتيب. U_C ج م م السرعة الحجمية المركبة للحجاب. U_p ج م م السرعة الحجمية المركبة للمنفذ. لاحظ أن الإشارة السالبة تستخدم مع U_p ، لأنه، فيما عدا مع إزاحة الطور المتولد بواسطة R_{AB} و C_{AB} فإن الهواء من المنفذ يتحرك نحو الخارج عندما يتحرك الهواء من الحجاب نحو الداخل.

أيضا، يكون ج م م السرعة الحجمية المركبة اللازمة لضغط وتمدد الهواء في الصندوق على الصورة،

$$U_B = U_c - U_p \qquad \text{8-48سلطان}$$

إذا افترضنا الآن أن $r_1 = r_2 = r$ عندما نحصر انتباهنا في نقطة خاصة في الفضاء عند مقدمة السماعة حيث يكون هذا حقيقى، نحصل على،

$$p \approx \frac{f\,\rho_o}{2r}(U_c - U_p)e^{-i\psi} \qquad \text{8-49}$$

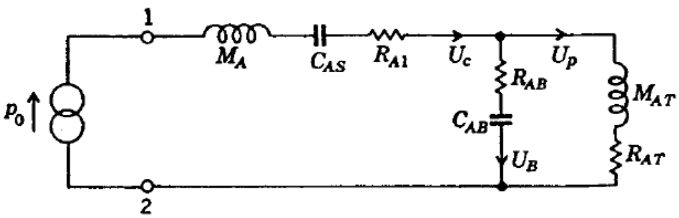
حيث ψ هي زاوية الطور وتساوى $kr - \pi/2$ بالتقدير القطرى.

بما أن $U_B = U_c - U_p$ فإننا نحصل ببساطة على،

$$|p| \approx \frac{f\rho_o |U_B|}{2r} \qquad \text{8-50}$$

من المدهش، كما يبدو، أن ضغط الصوت المتولد عند النقط البعيدة المتساوية البعد عن بوق ومنفذ سماعة انعكاس الجهير يتناسب طرديا مع السرعة الحجمية اللازمة لضغط وتمديد الهواء داخل الصندوق.

عند الترددات المنخفضة جدا، حيث تكون المفاعلة C_{AB} كبيرة جدا، فإن U_c تصبح مساوية تقريبا لـ U_p، والضغط المقاس عند النقط $r_1 = r_2 = r$ يقترب من الصفر. في الحقيقة، يتصرف كلا المصدرين مثل ثنائي قطب بحيث يتناقص ضغط الصوت المشع بمعامل 4 لكل تنصيف للتردد. علاوة على ذلك، إذا كنا أسفل أدنى تردد رنين للدائرة في الشكل 18.8، فإن سرعة الحجاب U_c تنصف لكل تنصيف للتردد. بالتالي، في هذه المنطقة للتردد المنخفض جدا، فإن ضغط الصوت يتناقص بمعامل 8 (أي 18 ديسيبل) لكل عملية تنصيف للتردد. لاحظ أن هذا التناقص يكون أكبر منه في حالة السماعة في الصندوق المغلق أو في الحاجز اللانهائي.



الشكل 19.8 تبسيط للدائرة المبينة في الشكل 18.8. ضغط المولد p_o يساوي $e_g Bl/(R_g + R_E)S_D$.

13.8 ترددات الرنين

من أجل تبسيط تحليلنا دعنا نعيد رسم الشكل 18.8 ليكون كما يظهر في الشكل 19.8. تعرف الكميات الجديدة المبينة على تلك الدائرة كما يلي:

$$M_A = M_{AD} + M_{A1} + M_{AB} \qquad \text{8-51}$$

$$P_{A1} = \frac{B^2 l^2}{(R_g + R_E)S_D{}^2} + R_{AS} + \Re_{AR1} \qquad \text{8-52}$$

$$M_{AT} = M_{A2} + M_{AP} \qquad \text{8-53}$$

$$R_{AT} = R_{AP} + \Re_{AR2} \qquad \text{8-54}$$

قد يوضع تردد الرنين للوعاء المفتوح (المثقوب) ($\omega_o = 1/\sqrt{C_{AB} M_{AT}}$) أو قد لا يوضع مساويا لتردد رنين السماعة ذاتها. كما هو شائع عمليا، دع ترددات رنين الوعاء والسماعة تساوي ω_o،

بمعنى دع،

$$M_A C_{AS} = M_{AT} C_{AB} = \frac{1}{\omega_o^{\ 2}}$$ سلطان8-55

عند التردد الزاوي ω_o ، تصبح معاوقة الوعاء كبيرة جدا، ويحدث كل الإشعاع تقريبا عند المنفذ. بمعنى آخر، U_c تقترب من الصفر، و U_p تصبح كبيرة.

كخطوات إضافية في معالجة الدائرة المبينة في الشكل 8ـ19، دعنا نعرف الكميات Q للأجزاء المختلفة للدائرة كما يلي،

$$Q_1 \equiv \frac{\omega_o M_A}{R_{A1}} = \frac{1}{\omega_o C_{AS} R_{A1}}$$ سلطان8-56

$$Q_C \equiv \frac{1}{\omega_o C_{AB} R_{AB}}$$ سلطان8-57

$$Q_M \equiv \frac{\omega_o M_{AT}}{R_{AT}}$$ سلطان8-58

$$Q_2 \equiv \frac{\omega_o M_{AT}}{R_{AT} + R_{AB}} = \frac{1}{\omega_o C_{AB}(R_{AT} + R_{AB})}$$ سلطان8-59

المعاوقة الكلية Z_A بالنظر إلى يمين الأطراف 1 و2 في الشكل 8ـ19 تساوى،

$$Z_A = \left[\frac{R_{AT}\left(\frac{\omega_0^2}{\omega^2} + \frac{1}{Q_c^2}\right) + R_{AB}\left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} + \frac{1}{Q_M^2}\right)}{\frac{1}{Q_2^2} + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} + R_{A1} \right] + j\left[\frac{1}{\omega_0 C_{AB}} \frac{\frac{\omega}{\omega_0 Q_c^2} - \frac{\omega_0}{\omega Q_M^2} - \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}{\frac{1}{Q_2^2} + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} + \omega_0 M_A \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) \right]$$ سلطان8-60

في حالة المفاعلة تساوى الصفر نجد أن،

$$\frac{C_{AS}}{C_{AB}} = \frac{M_{AT}}{M_A} = \frac{\frac{1}{Q_2{}^2} + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}{1 + \frac{1}{\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}}\left(\frac{1}{Q_M{}^2 \frac{\omega}{\omega_0}} - \frac{1}{Q_c{}^2 \frac{\omega_0}{\omega}}\right)} \qquad \text{8-61}$$

أيضا، سوف نحتاج إلى U_B بدلالة U_c،

$$U_B = \frac{\left(\frac{1}{Q_M} + j\frac{\omega}{\omega_0}\right) U_c}{(1/Q_2) + j[(\omega/\omega_0) - (\omega_0/\omega)]} \qquad \text{8-62}$$

سلطان

من الصعب معالجة هذه المعادلات إذا كانت Q_2 صغيرة. علاوة على ذلك، لا توجد ميزة لصندوق انعكاس – الجهير يتميز بها على الصندوق المغلق ا إذا كانت Q_2 صغيرة. إذا كانت R_{AT} كبيرة، فإن الصندوق يصبح كما هو عندما يكون مغلق بإحكام. إذا كانت R_{AB} كبيرة، حينئذ تكون U_B صغيرة ويكون من الأفضل استخدام حاجز صندوق مغلق. سوف تقتصر دراستنا على حالة Q_2 أكبر من 2.5.

سوف تقتصر دراستنا أيضا على الحالات حيث تكون المقاومة أساسا في إما المنفذ أو في الصندوق لكن ليس في كليهما. حينئذ، Q_2 تساوى إما Q_M أو Q_c.

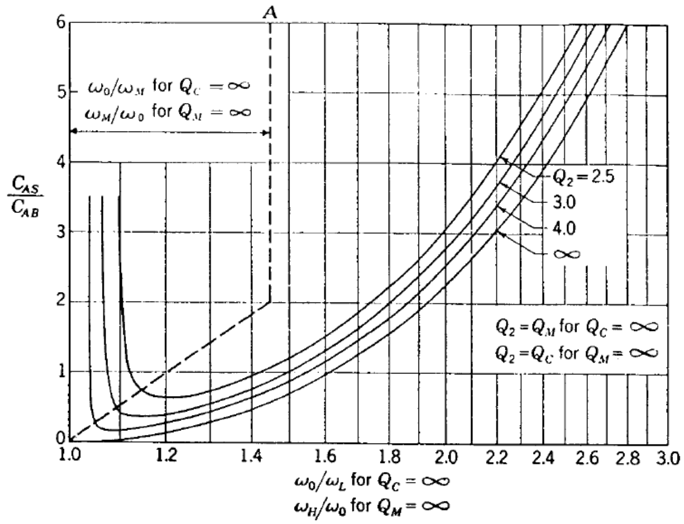
عند هذه الشروط توجد بشكل عام ثلاثة ترددات رنين هي ω_L ، ω_M ، و ω_H والتي عندها تصبح المفاعلة إلى اليمين من الأطراف 1 و2 صفر عند قيم معطاة لـ Q_2 و C_{AS}/C_{AB}. يكون أحد هذه الترددات (ω_M) قريبا من تردد الرنين ω_o. تردد أخر (ω_H) يحدث عند قيمة أكبر من ω_o. التردد الثالث، ω_L ، يحدث عند قيمة أقل من ω_o.

توجد ترددات الرنين العلوي والسفلي الموجودة من المعادلة 8ـ61 كما يلي: ضع $Q_c = \infty$ و $Q_2 = Q_M$. ثم عين ω_o / ω_L و ω_H / ω_o. ترسم النتائج في الأشكال 8ـ20 و8ـ21، على الترتيب. بعد ذلك، ضع $Q_M = \infty$ و $Q_2 = Q_c$. ثم عين ω_o / ω_L و ω_H / ω_o. ترسم النتائج في الأشكال 8ـ21 و8ـ20 على الترتيب. بمعنى أخر، الشكل 8ـ20 يعطى تردد الرنين السفلى عند $Q_c = \infty$

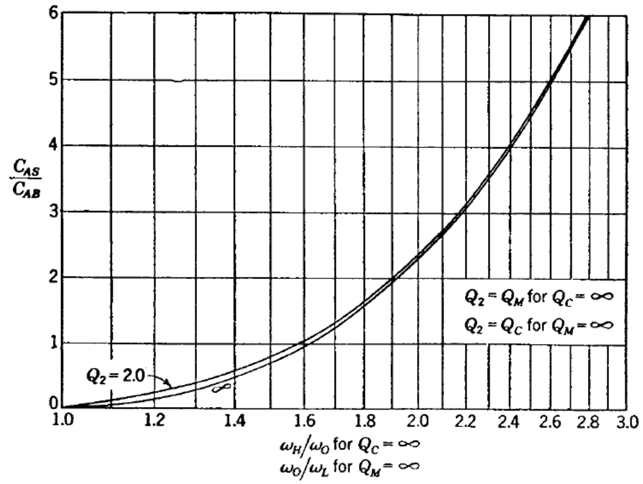
وتردد الرنين العلوي عند $Q_M = \infty$. الشكل 21.8 يعطى تردد الرنين العلوي عند $Q_c = \infty$

وتردد الرنين السفلى عند $Q_M = \infty$.

إذا كانت Q_2 اكبر من 10 تقريبا، فإن ترددى الرنين ω_L ، و ω_H يكونا موضوعان بالتماثل على جانبى ω_o للقيمة المعطاة للنسبة C_{AS} / C_{AB} . بمعنى أن $\omega_o / \omega_L \approx \omega_H / \omega_o$.



الشكل 20.8 قيمة إثنين من ترددات المفاعلة – الصفرية لنظام سماعة عاكس – الجهير كدالة في $C_{AS} / C_{AB} = M_{AT} / M_{AS}$ مع Q_2 كمتغير. ω_o هو تردد الرنين إما لفرع التوالى أو لفرع التوازى في الشكل 19.8. المنطقة على يمين الخط المتقطع A يعطى ω_o / ω_2 عند $Q_C = \infty$ أو ω_H / ω_o عند $Q_M = \infty$. الخطوط الرأسية تقريبا على يسار الخط المتقطع A تعطى ω_H / ω_o عند $Q_M = \infty$ أو ω_o / ω_M عند $Q_C = \infty$.



الشكل 8ـ21 قيمة تردد واحد من ترددات المفاعلة – الصفرية لنظام سماعة عاكس – الجهير كدالة في $C_{AS}/C_{AB} = M_{AT}/M_{AS}$ مع Q_2 كمتغير. ω_o هو تردد الرنين إما لفرع التوالي أو لفرع التوازي في الشكل 8ـ19.

يكون إيجاد ترددات الرنين في أنظمة السماعات، حيث لا يكون لأفرع التوالى والتوازى في الشكل 8ـ19 نفس تردد الرنين الزاوى، فإن العملية تكون أكثر صعوبة. فإذا وضعنا $Q_2 = \infty$ وإذا كانت ترددات الرنين الزاوية لجزئى الدائرة هي ω_1 و ω_2 فإنه في حالة أن المفاعلة الموجودة على يمين الأطراف 1 و2 في الشكل 8ـ18 تساوى الصفر نجد أن،

$$\frac{C_{AS}}{C_{AB}} = \frac{M_{AT}}{M_A} = G^2\frac{K^4+1}{K^4} - (G^4+1) \qquad 8\text{-}63$$

حيث ω_o المتوسط – الهندسى لتردد زاوى يساوى $\sqrt{\omega_1\omega_2}$ و$\omega_1 = G\omega_o$، $\omega_2 = \omega_o/G$، و $\omega_H/\omega_o = K = \omega_o/\omega_L$. لاحظ أن هذه المعادلة تكون متماثلة حول ω_o تماما كما تكون المعادلة 8ـ61 عند $Q_2 = \infty$.

8ـ14 ضغط الصوت المرجعى

تم مناقشة مبدأ ضغط الصوت المرجعى في الجزء التاسع والعشرون وهنا يتم التعبير عنه كما يلى:

$$|p_C| = \frac{e_g Bl\rho_o}{(R_g+R_E)M_A 4\pi r S_D} \qquad 8\text{-}64$$

بغرض المراجعة، $|p_C|$ هو ضغط الصوت الذي سوف يتولد عند المسافة r إذا كان التردد أعلى من التردد الحرج ω_H وإذا كانت السماعة غير موجهة.

15.8 ضغط الصوت المشع عند الترددات الحرجة

نتوقع أنه يوجد تأرجحات مهمة في منحنيات الاستجابة عند الثلاثة ترددات الحرجة ω_H ، ω_M ، و ω_L . عند $\omega_M \approx \omega_o$ ، يحدث الإشعاع أساسا من المنفذ، ويعتمد الضغط المشع هناك على كل من Q_1 و Q_2 . بغض النظر عن قيم Q_2 و C_{AS}/C_{AB} ، فإن التردد العلوى للمفاعلة الصفرية (ω_H) يكون تقريبا كما هو في حالة المنفذ المغلق. يمكن رؤية هذا بمقارنة المنحنى في الشكل 8-21 عند $Q_2 = 2$ مع المنحنى عند $Q_2 = \infty$. إذا كان $\omega_H / \omega_g \approx 1$ صغيرا، فإن استجابة السماعة ذات الوعاء المفتوح سوف يكون تقريبا مثل استجابة نفس السماعة في حاجز لانهائى. هذا الشرط يتطلب صندوق كبير (C_{AB} كبيرة) والذي يقترب بوضوح من كونه حاجز لانهائى.

<u>عند $R_{AB} \approx 0 (Q_C \approx \infty)$ ، لمادة صوتية في الصندوق.</u>

نجد مقدار النسبة بين ج م م ضغط الصوت والضغط المرجعى عند الترددات الثلاثة ω_L ، ω_M ، و ω_H ، من المعادلات 8-50، 8-62، و8-64 وبواسطة الحل بالنسبة إلى U_c من الشكل 8-19 بمساعدة المعادلة 8-60.

<u>عند $\omega = \omega_L$</u>

نسبة الضغط عند التردد الحرج الأدنى تكون

$$\left|\frac{p_L}{p_C}\right| = \frac{\sqrt{1 + Q_M{}^2(\omega_L/\omega_0)^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_0{}^2}{\omega_L{}^2}\right)^2 + \frac{\omega_0{}^2}{Q_M{}^2\omega_L{}^2}\left[\frac{Q_M}{Q_1} + \frac{\omega_0{}^2/\omega_L{}^2}{1 + \frac{1}{Q_M{}^2(\omega_L{}^2/\omega_0{}^2 - 1)}}\right]}} \qquad \text{8-65}$$

تعطى رسومات هذه المعادلة، بالديسيبل، في الشكل 8-22 لأربعة قيم للنسبة ω_o / ω_L .

<u>عند $\omega = \omega_M \approx \omega_o$</u>

تكون نسبة الضغط عند التردد الحرج المتوسط

$$\left|\frac{p_M}{p_c}\right| = \frac{\sqrt{1+1/Q_M{}^2}}{C_{AS}/C_{AB} + 1/Q_1 Q_M} \qquad \text{سلطان 8-66}$$

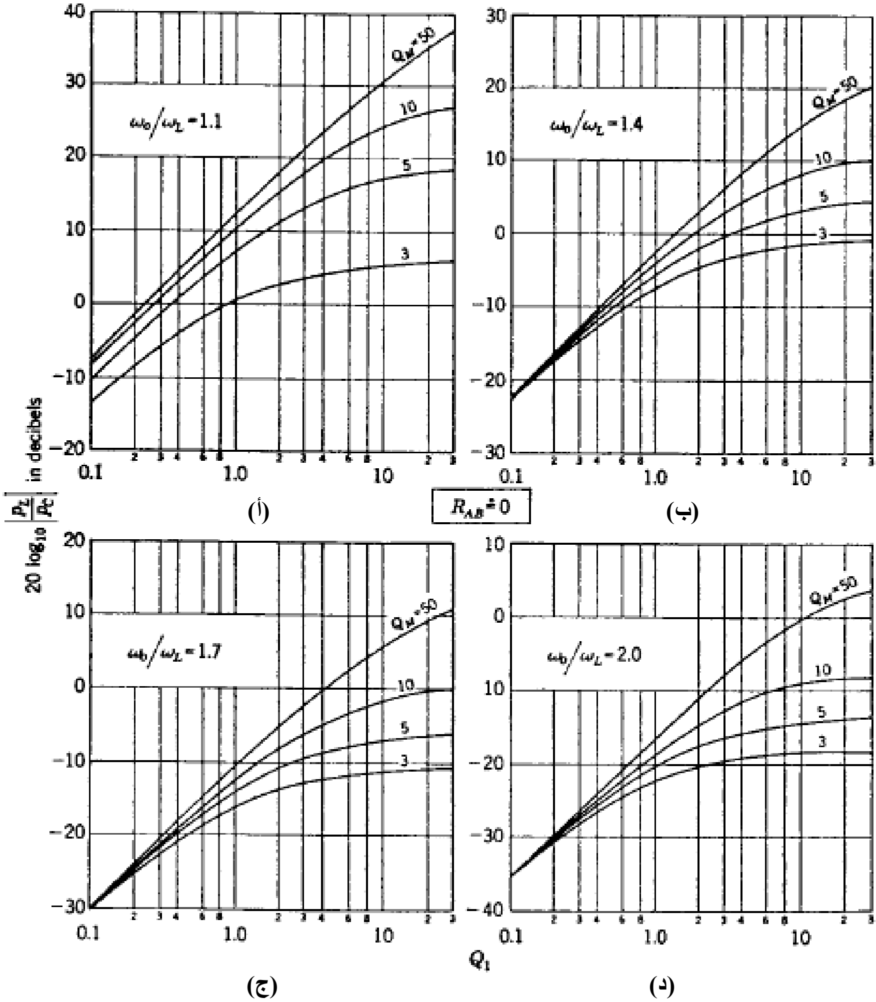
تعطى رسومات هذه المعادلة، بالديسيبل، في الشكل 8ـ23 لأربعة قيم للنسبة C_{AS}/C_{AB}.

<u>عند $\omega = \omega_H$</u>

نسبة الضغط عند التردد الحرج الأعلى تكون،

$$\left|\frac{p_H}{p_c}\right| = \frac{\sqrt{1+Q_M{}^2(\omega_H/\omega_o)^2}}{\sqrt{\left(1-\frac{\omega_o{}^2}{\omega_H{}^2}\right)^2 + \frac{\omega_o{}^2}{Q_M{}^2\omega_H{}^2}\left[\frac{Q_M}{Q_1} + \frac{\omega_o{}^2/\omega_H{}^2}{\frac{1}{Q_M{}^2(\omega_H{}^2/\omega_o{}^2-1)}}\right]}} \qquad \text{سلطان 8-67}$$

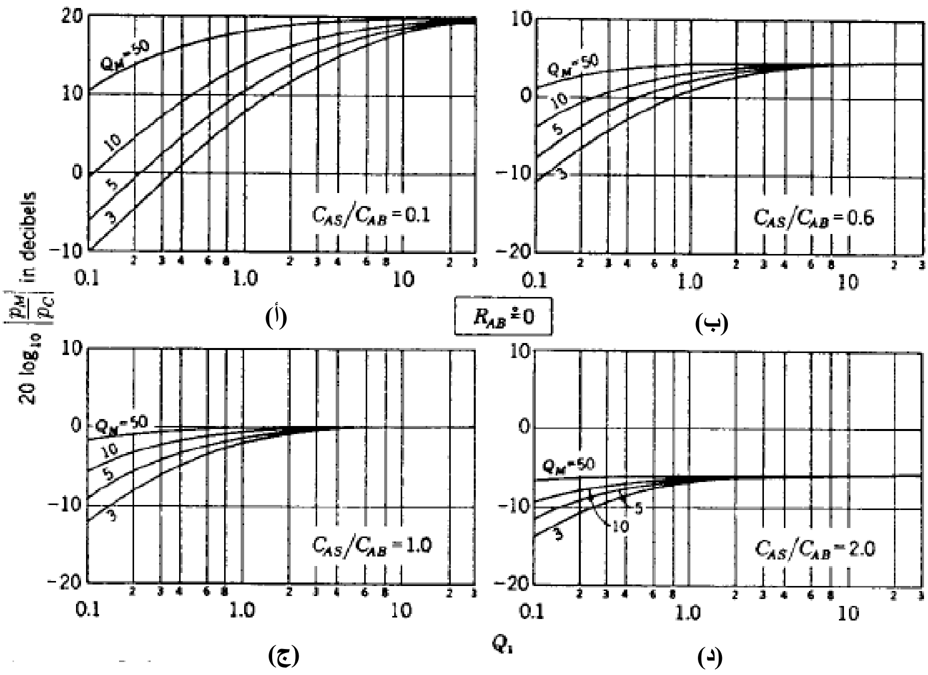
تعطى رسومات هذه المعادلة، بالديسيبل، في الشكل 8ـ24 لأربعة قيم للنسبة ω_H/ω_o.



الشكل 22.8 الاستجابة النسبية عند التردد الحرج الأدنى، ω_L عند $R_{AB} \approx 0$ كدالة في Q_M و Q_1. الصندوق غير مبطن.

عند $R_{AT} \approx 0\ (Q_M \approx \infty)$ ، لمادة صوتية في الصندوق

يوجد مقدار نسبة ج م م ضغط الصوت إلى ضغط الصوت المرجعي باستخدام نفس المعادلات والأشكال كما في حالة $Q_c = \infty$.



الشكل 8ـ23 الاستجابة النسبية عند التردد الحرج الأوسط، $\omega_M \approx \omega_o$ عند $R_{AB} \approx 0$ كدالة في Q_M و Q_1. الصندوق غير مبطن.

عند $\omega = \omega_L$

نسبة الضغط عند التردد الحرج الأدنى تكون

$$\left|\frac{p_L}{p_C}\right| = \frac{(\omega_L/\omega_0)Q_c}{\sqrt{\left(1-\frac{\omega_0^2}{\omega_L^2}\right)^2 + \frac{\omega_0^2}{Q_c^2\omega_L^2}\left[\frac{\omega_0^2/\omega_L^2}{1+\frac{1}{Q_c^2(\omega_0^2/\omega_L^2-1)}} + \frac{Q_c}{Q_1}\right]}} \qquad \text{سلطان } 8\text{-}68$$

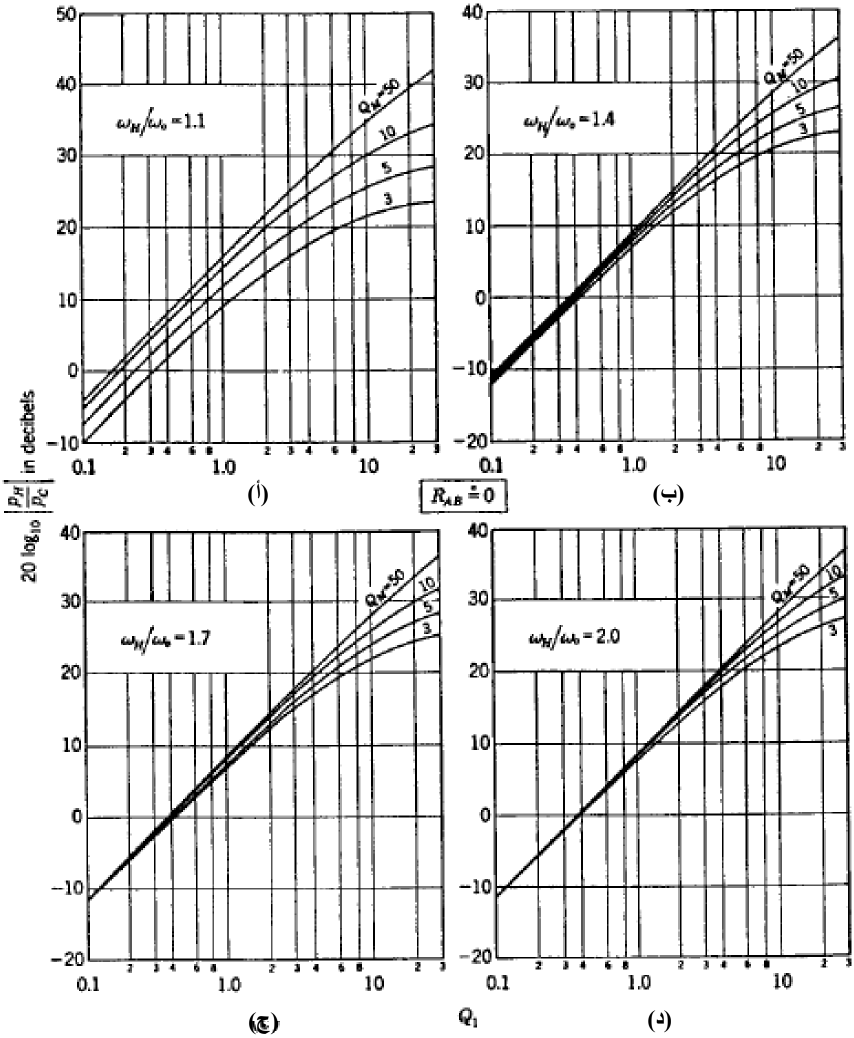
تم رسم هذه المعادلة، بالديسيبل، في الشكل 8ـ25 لأربعة قيم للنسبة ω_o / ω_L.

عند $\omega = \omega_M \approx \omega_o$

نسبة الضغط عند التردد الحرج المتوسط تكون على الصورة،

$$\left|\frac{p_M}{p_C}\right| = \frac{1}{C_{AS}/C_{AB} + 1/Q_1 Q_c} \qquad 8\text{-}69$$

تم رسم هذه المعادلة، بالديسيبل، في الشكل 8-26 لأربعة قيم للنسبة C_{AS}/C_{AB}.



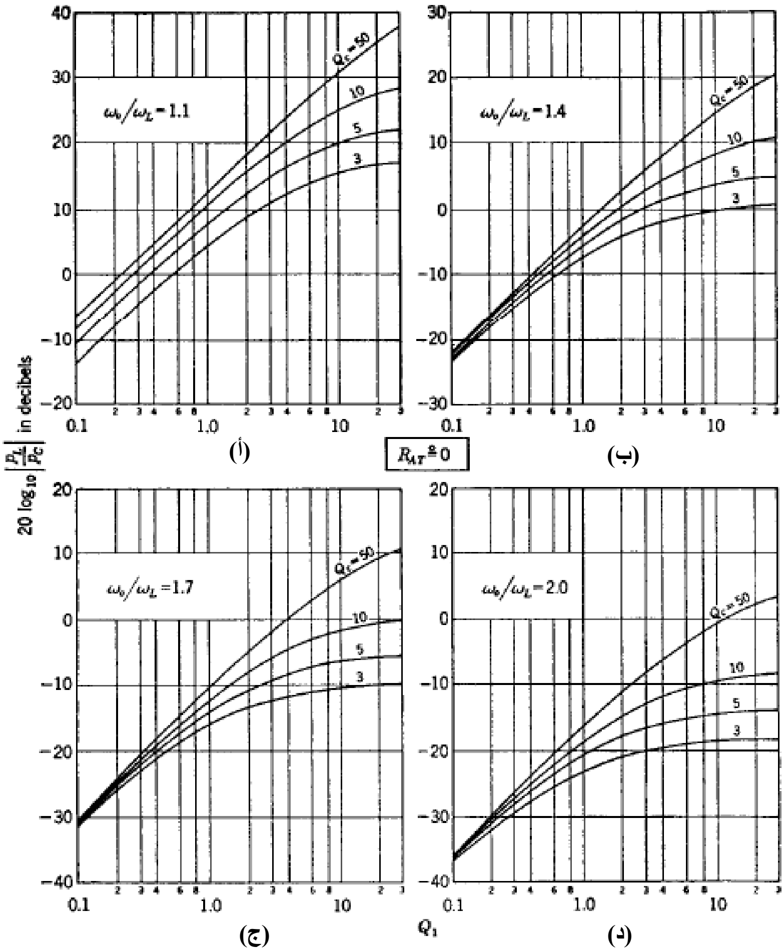
الشكل 8-24 الاستجابة النسبية عند التردد الحرج الأعلى، ω_H **عند** $R_{AB} \approx 0$ **كدالة في** Q_M **و** Q_1**. الصندوق غير مبطن.**

عند $\omega = \omega_H$

نسبة الضغط عند التردد الحرج العلوي تكون على الصورة،

$$\left|\frac{p_H}{p_C}\right| = \frac{(\omega_H/\omega_0)Q_c}{\sqrt{\left(1-\frac{\omega_0^2}{\omega_H^2}\right)^2 + \frac{\omega_0^2}{Q_c^2\omega_H^2}\left[\frac{\omega_0^2/\omega_H^2}{1+\frac{1}{Q_c^2(\omega_0^2/\omega_H^2-1)}} + \frac{Q_c}{Q_1}\right]}} \qquad 70\text{-}8$$

تم رسم هذه المعادلة، بالديسيبل، في الشكل 8ـ27 لأربعة قيم للنسبة ω_H / ω_o .



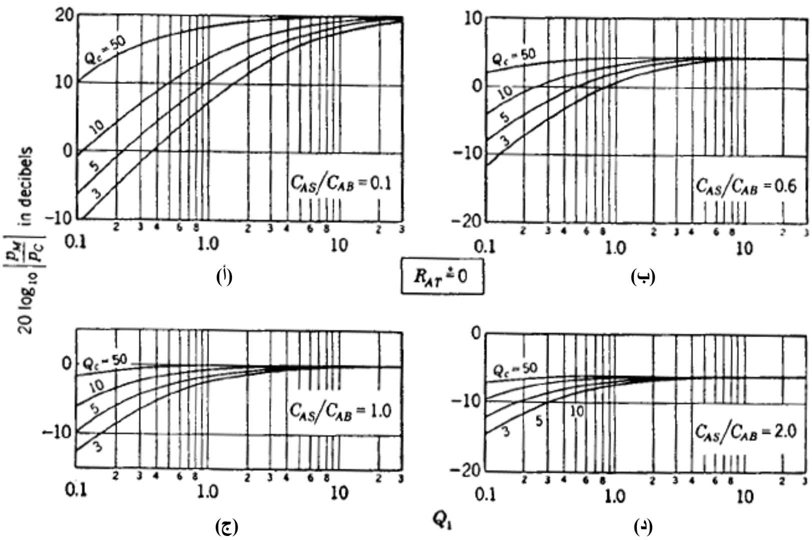
الشكل 8ـ25 الاستجابة النسبية عند التردد الحرج الأدنى، ω_L عند $R_{AT} \approx 0$ كدالة في Q_c و Q_1 .
الصندوق مبطن.

8ـ16 الأداء

بالصيغ والمخططات التي أعطيت توا، من الممكن حساب استجابة السماعة في وعاء انعكاس –

الجهير عند الترددات الحرجة الثلاثة. تم إعطاء مثال كامل في الفصل 8ـ18.

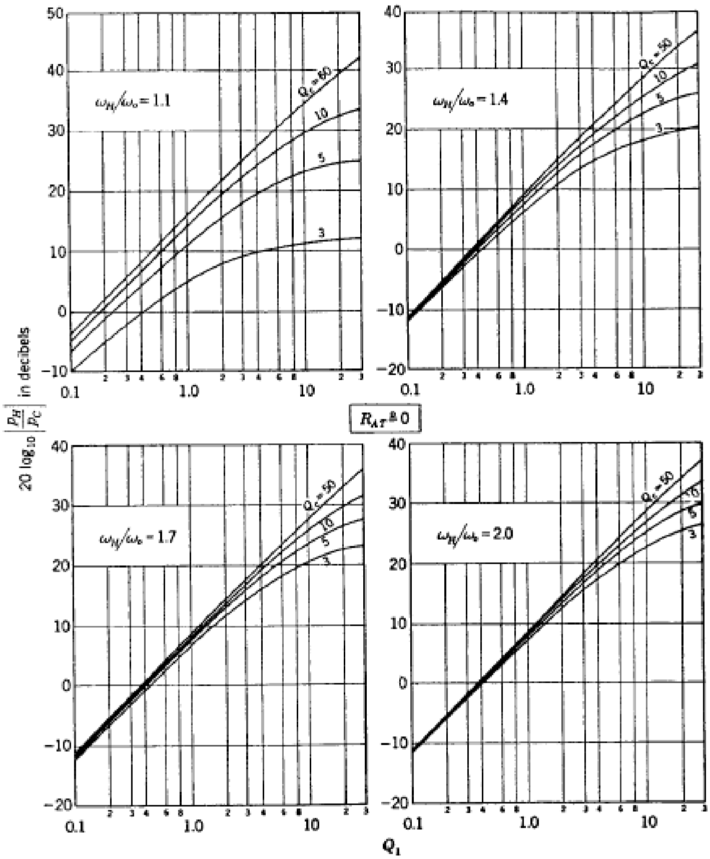
من الشكل 8ـ19، نرى أنه للترددات أسفل ω_o ، يكون الإشعاع من المنفذ (يتناسب مع $-U_p$) خارج الطور مع الإشعاع من الحجاب (يتناسب مع U_c). يترتب على ذلك، أن الاستجابة عند الترددات المنخفضة جدا لا تتحسن في العادة بإضافة المنفذ. فوق تردد الرنين ω_o ، يكون الإشعاع من المنفذ في طور واحد مع الإشعاع من الحجاب، مع تحسن ناتج عن استجابة الحاجز المغلق. مقدار الزيادة في الاستجابة في المتوسط يكون 5 ديسيبل على طول مدى تردد يتراوح من واحد إلى إثنين أوكتاف.



الشكل 8ـ26 الاستجابة النسبية عند التردد الحرج الأوسط، $\omega_M \approx \omega_o$ عند $R_{AT} \approx 0$

كدالة في Q_c و Q_1 . الصندوق مبطن.

السبب المهم لاستخدام وعاء انعكاس – الجهير هو أن السماعة تولد تشوه أقل عند الترددات بين ω_o و $2\omega_o$ لقدرة صوتية مشعة معينة عنه في حالة إذا ما كان الصندوق مغلق. الافتراض الذي يستند عليه هذا الإقرار هو أن حركة الهواء في المنفذ تكون بدون تشوه حتى لو كانت سعة الاهتزاز كبيرة. يكون هذا حقيقي بشكل عام لأنه لا يوجد تعليق أو دائرة مغناطيسية في المنفذ والتي يحدث فيها تأثيرات غير خطية. يكون حجاب السماعة الكبير أفضل من الحجاب الصغير لأن سعة حركته تكون أقل، الأمر الذي يقلل التشوه غير الخطي.



الشكل 27.8 الاستجابة النسبية عند التردد الحرج الأوسط، ω_H **عند** $R_{AT} \approx 0$ **كدالة في** Q_c **و** Q_1.
الصندوق مبطن.

يجب وضع المنفذ بالقرب من السماعة لتفادى نموذج التوجيهية غير المنتظم مع زيادة التردد كلما أمكن وتحقيق اتساع مدى التردد الممكن للتحسن.

ميزة السماعة في الصندوق المغلق ذات انعكاس – الجهير هي أنه، حيث يكون الفضاء عامل، فإن نظام انعكاس – الجهير يساعد على تعويض (موازنة) تأثير حجم الوعاء الصغير. بالنسبة لحجم الوعاء الصغير من الأفضل توليف المنفذ تماما مع رنين السماعة.

لكل وعاء كبير، من الجائز تنغيم المنفذ إلى تردد يكون أسفل تردد رنين السماعة. هذا يتيح استخدام منفذ لا يزيد عن مرة ونصف إلى مرتين قدر المساحة الفعالة للسماعة.

17.8 ملاحظات البناء والضبط

يجب أن يكون الصندوق صلب جدا لكي يقاوم الاهتزاز. يجب أن تكون المفاصل ضيقة وملصوقة مربوطة

المفاصل يجب أن تكون ضيقة وملتصقة ويجب أن تثبت اللوحات الأكبر عن طريق لصق الأشرطة المعززة لها، كما أن جانب الدخول يجب أن يشد عليه بشكل آمن.

عند بناء الصندوق لتحقيق حجم مرغوب، يجب الأخذ في الاعتبار حجم الهواء المزاح بالسماعة وبالامتداد الداخلى للمنفذ إن وجد. وكما قيل من قبل، حجم الهواء المزاح بواسطة السماعة (بالمتر المكعب) يساوى تقريبا 0.4 مرة من القطر المعلن (بالمتر) مرفوع إلى الرتبة الرابعة.

عندما يتم استكمال الخزانة وتثبيت السماعة، يمكن تعيين التصحيح بتوصيل مذبذب صوتى مع معاوقة خرج تكون 100 مرة تقريبا قدر معاوقة السماعة إلى الأطراف الكهربية. بعد ذلك، يوصل الفولتميتر عبر أطراف السماعة. حينئذ، يتم تغيير تردد المذبذب حتى يلاحظ الترددين الحرجين ω_L و ω_H على هيئة قمم في قراءة الفولتميتر. يجب أن يحدث هذا عند الترددات المحسوبة إذا كان التصميم صحيح.

يمكن زيادة تردد الرنين للوعاء عن طريق تقليل الحجم المغلق V_B. يمكن تحقيق ذلك بوضع مكعبات من الخشب داخل الصندوق من خلال فتحة المنفذ. يمكن تقليل مساحة المنفذ لتقليل تردد رنين الوعاء.

18.8 مثال لتصميم وعاء انعكاس – الجهير

في الجزء السابق ناقشنا تصميم حاجز الصندوق – المغلق لسماعة التردد – المنخفض (الويفر). عرضنا طرق تعيين ثوابتها الفيزيائية وقمنا ببيان مقارنة بين القياسات والحسابات.

في هذا الجزء سوف نستخدم نفس وحدة السماعة والصندوق. سوف يتم إدخال منفذ إلى الصندوق الذي يرن (أى يحدث رنين) مع مطاوعة الصندوق عند نفس التردد كفرع التوالى في الدائرة المبينة في الشكل 19.8، أى أن $\omega_o = 1/\sqrt{M_A C_{AS}}$.

أعطيت حجوم العنصر في المثال 8ـ3، ماعدا أن تردد الرنين ω_o يكون مختلفا في التحليل الحالى، بمعنى،

$$\begin{aligned} \omega_0 &= 1/\sqrt{M_A C_{AS}} = 10^3/\sqrt{(10.27)(1.82)} = 231 \text{ radians/sec} \\ f_0 &= \omega_0/2\pi = 36.8 \text{ cps} \\ C_{AS}/C_{AB} &= 1.82/2.14 = 0.85 \\ M_{AT} &= C_{AS}M_A/C_{AB} = (0.85)(10.27) = 8.74 \text{ kg/m}^4 \end{aligned}$$

يجب اختيار مساحة المنفذ. إذا كان محيط المنفذ أقل من نصف الطول الموجى، فإن المنفذ يعمل كمصدر بسيط وسوف يشع نفس كمية القدرة بغض النظر عن حجمه عند السرعة الحجمية المعطاة. بشكل اختياري، دعنا نختار المساحة S_p لتكون أقل من نصف مساحة الحجاب، مثلا، $S_p = 0.055\ m^2$.

أحسب الكتلة الصوتية عند النهاية الخارجية للمنفذ.

$$\begin{aligned} M_{A2} &= \frac{0.6\,a_2\rho_o}{S_p} = \frac{0.6\,\rho_o}{\sqrt{S_p\,\pi}} \\ &= \frac{(0.6)(1.18)}{\sqrt{(0.055)(3.1416)}} = 1.70\ kg/m^4 \end{aligned}$$

تكون الكتلة المتبقية للمنفذ،

$$\begin{aligned} M_{AP} &= M_{AT} - M_{A2} = 8.74 - 1.7 = 7.04 \quad \text{kg/m}^4 \\ &= 7.04 = \frac{(t + 0.6a_2)\rho_o}{S_p} = \frac{t(1.18)}{0.055} + 1.7 \end{aligned}$$

لذلك فإن t، طول الأنبوبة خلف المنفذ، يكون

$$t = \frac{7.04 - 1.7}{21.4} = 0.25 \text{ m}$$

هذا يعنى أن طول الأنبوبة خلف المنفذ يجب أن يكون 9.8 بوصة تقريبا.

يتم إيجاد المقاومة الصوتية للمنفذ من المعادلة 5ـ54،

$$R_{AP}=\frac{1.18}{0.055}\sqrt{2\omega(15.6)}\times10^{-3}\left(\frac{0.25}{0.133}+1\right)$$
$$=\sqrt{\omega}\,(0.12)\quad \text{mks acoustic ohms}$$

لإيجاد القيمة المتوسطة لـ R_{AP}، دعنا نأخذ $\omega=\omega_o$.

$$R_{AP}=\sqrt{231}(0.12)\approx1.82\ \text{mks acoustic ohms}$$ سلطان

تكون مقاومة الجانب الأمامي للمنفذ هي

$$\Re_{AR2}=\frac{\pi f^2\rho_o}{c}=\Re_{AR1}=0.0107f^2$$

بفرض $\Re_{AR1}$، $\Re_{AR2}$ تتساوى قيمتهما عند $\omega=\omega_o$، بمعنى، $f_o=36.8$. حينئذ

$$\Re_{AR1}=\Re_{AR2}=(0.0107)(1355)=14.5\ \text{mks acousticohms}$$

أخيرا،

$$R_{AT}=R_{AP}+\Re_{AR2}\approx16.3\ \text{mks acousticohms}$$

و للاستعمال التالي،

$$R_{A1}=\frac{9.7\times10^4}{R_g+5.5}+356+15\ \text{mks acousticohms}$$

$$Q_M=\frac{(231)(8.74)}{16.3}\approx114$$

تكون قيمة Q هذه كبيرة جدا. دعنا نرى ما إذا كانت Q_c أصغر أم لا. الصندوق المحتوى على قطعة ألياف زجاجية 18 في 35 في 3 بوصة لها مقاومة تدفق 2000 رايليى/بوصة في م كجم ث (أو 6000 رايليى/ 3بوصة في م كجم ث). بالتالي، من الفصل 8ـ9 نحصل على،

$$R_{AM}=\frac{6000}{(3)(0.406)}=4920$$

$$R_{AB}\approx\frac{4920}{(231)^2(2.14)^2\times10^{-12}(4920)^2+(7)^2}=90\ \text{mks acousticohms}$$

$$Q_c=\frac{10^6}{(90)(231)(2.14)}\approx22$$

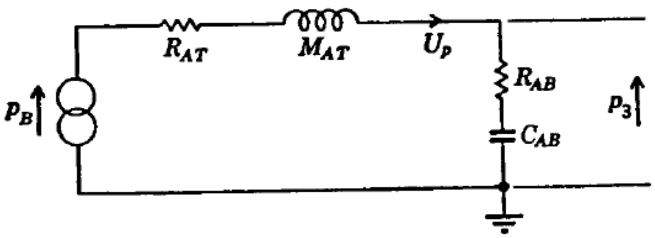
و

$$Q_2 = \frac{(231)(8.74)}{16.3+90} \approx 19$$

بالتالي يمكننا افتراض أن $Q_2 \approx Q_c$.

يمكن قياس Q_c للصندوق باستبدال وحدة السماعة بلوحة صلبة ووضع الصندوق في الفضاء الحر، سوية مع مصدر الصوت ذى التردد المتغير. بالإشارة إلى الأشكال 8ـ19 و8ـ28 يتبين أنه إذا كانت $U_c = 0$، فإن $U_B = U_p-$. وضع الميكروفون داخل الصندوق يقيس هبوط ضغط الصوت p_2 عبر المطاوعة C_{AB}. حينئذ، يتم عمل الرسم كدالة في حاصل ضرب ضغط الصوت هذا وتردد المذبذب. يتناسب هذا الرسم مع السرعة الحجمية U_p. حينئذ، يتم إيجاد Q_2 بقسمة التردد (بالهيرتز) لقمة المنحنى على عرض المنحنى (بالهيرتز) عند النقط حيث تكون السرعة الحجمية 0.707 من قيمة الذروة (القمة).

هذه القياسات التي تمت على الصندوق الخاص بنا تعطى القيمة $Q_2 = 7$، وهي قيمة أقل بكثير من القيمة المحسوبة. التفسير المعقول لهذا هو أن ذلك الخشب الحبيبى يمتص طاقة داخليا عندما يلتوى (يثني). طبقا للمعلومات الموجودة في المراجع، فإن صندوق الخشب الحبيبى 4/3 بوصة يمتص عند تردد 40 هيرتز حوالي نصف الطاقة الصوتية لكل قدم مربع التي تمتصها طبقة الليف الزجاجى ذات السمك 3 بوصة عند نفس التردد. بالطبع، يكون هذا دالة في حجم اللوحة، نوع الصمغ، والتثبيت، لذلك، في أحسن الأحوال يمكن فقط عمل تخمين تقريبى. عند تردد 100 هيرتز فإن طبقة الليف الزجاجى سمك 3 بوصة سوف تمتص طاقة أكثر بكثير من صندوق الخشب.



الشكل 8ـ28 دائرة تبين السرعة الحجمية لمنفذ لمصدر صوت خارجى عندما يكون بوق السماعة

معاق بحيث لا يستطيع التحرك. يكون ضغط الصوت p_B هو ضغط الصوت الموجود عند مدخل المنفذ إذا كان المنفذ معاق بحيث $U_p = 0$. مقدار السرعة الحجمية U_p يساوى $|p_3|C_{AB}\omega$.

تم افتراض أن $R_{AB} << 1/\omega C_{AB}$.

بما أن مساحة جدران الصندوق تكون 6 أمثال مساحة الليف الزجاجي، فإن الصندوق يكافئ إضافة 3 مرات إضافية من المادة، مما سيجعل المجموع أربع مرات نفس قدر مساحة وحجم المادة الصوتية كالذي افترضناه الآن. ستكون المراجعة التقريبية لـ R_{AB} على النحو،

$$R_{AB} \approx 330 \text{ mks ascoustic ohms}$$

بالتالي فإن

$$Q_c \approx \frac{10^6}{(330)(231)(2.14)} = 6$$

هذا الرقم قريب جدا من القيمة المقاسة 7، لذلك سوف نفترض أن $Q_c = Q_2 = 7$.

من الأشكال 8ـ20 و8ـ21 نجد الترددات الحرجة الثلاثة

$$\omega_M \approx \omega_o = 231 \text{ radians/sec}$$

$$f_o = 36.8 \text{ Hz}$$

$$\omega_H = 1.55\omega_o = 358 \text{ radians/sec}$$

$$f_H = 57.0 \text{ Hz}$$

$$\omega_L = \frac{\omega_o}{1.56} = 148 \text{ radians/sec}$$

$$f_L = 23.6 \text{ Hz}$$

لتعيين استجابة ضغط – الصوت النسبى عند الترددات الحرجة الثلاثة، نستخدم الأشكال 8ـ25 حتى 8ـ27. أولا، سوف نعين Q_1 عند هذه عند الترددات الثلاثة للقيم الأربعة لمقاومة المكبر R_g: 3، 14، 30، و130 أوم. قيم R_{A1} و Q_1 معطاة في الجدول 8ـ5.

الجدول 8ـ5 قيم R_{A1} و Q_1 لمقاومة المكبر.

R_g, ohms	3	14	30	130
R_{A1}	1.18×10^4	5.3×10^3	3.1×10^3	1.09×10^3
Q_1	0.20	0.45	0.77	2.2

نحصل على قيم استجابة مستوى ـ ضغط ـ الصوت منسوبة إلى استجابة مستوى ـ ضغط ـ الصوت المرجعي عند الترددات الحرجة المعطاة في الجدول 8ـ6.

الجدول 8ـ6 استجابة مستوى ـ ضغط ـ الصوت منسوبة إلى استجابة مستوى ـ ضغط ـ الصوت المرجعي عند الترددات الحرجة.

f \ R_g	3	14	30	130
23.4 cps	−22 db	−15.6	−11.8	− 5.6
36.8 cps	− 3.9	− 1.4	− 0.3	+ 0.8
57.7 cps	− 5.7	+ 1.2	+ 5.8	+14.2

تبين مقارنة الأرقام المعطاة في الجدول 8ـ6 مع منحنيات الشكل 8ـ15 المحسوبة للصندوق المغلق أن التحسن المتوسط للاستجابة عند الترددين الحرجين العلويين كان في حدود 6 ديسيبل. بالمقارنة، بينت القياسات على هذه السماعة الخاصة زيادة متوسطة في الاستجابة 4 ديسيبل تقريبا. لم يقدم تفسير لهذا الفرق (2 ديسيبل). عادة تبين النتائج المدونة بواسطة ملاحظين أخرين تحسن في حدود 6 ديسيبل. من الممكن أن الانتقال خلال جدران جانب الصندوق، والتي تميل إلى توليد موجة خارج – الطور، يساهم في الفرق الناتج. لم يسمح الوقت لوضع الصندوق في الرمل أو في سترة خرسانية لتقرير مقدار هذا التأثير.

مراجع هذا الباب

1- H.F. Olson "Elements of Acoustical Engineering," 2nd ed., Chap. VI, Van Nostrand Company, Inc. New York, 1947. لمناقشة وعاء السماعة البسيطة انظر الصفحات 144ـ154.

2- D. J. Plach and P.B. Williams, Loudspeakers Enclosures, Audio Engineering, 35: 12 (July, 1951).

3- D.A. Dobson, " closed – box Loudspeaker Enclosures," master's thesis, Electrical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass. 1951.

4- F.E. Terman, Radio Engineers Handbook. " pp. 138-138 McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1943.

5- A.L. Thuras," Sound Translating Device," U.S. Patent No. 1,869,178, July, 1932 (filed 1930).

6- H. F. Olson, "Elements of Acoustical Engineering," 2nd ed. pp. 154-156, D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1947.

7- D.J. Plach and P.B. Williams, "Loudspeakers Enclosures,", Audio Engineering, 35: 12*ff*. (July, 1951).

8- J. J. Baruch and H.C. Lang, " Some Vented Enclosures for Loudspeakers, unpublished report of Acoustic Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., January 1953.

الباب التاسع
سماعات البوق
HORN LOUDSPEAKERS

الجزء الحادى والعشرون – وحدات البوق الدافعة

1.9 مقدمة

تتكون سماعات البوق (المخروط) في العادة من وحدة دفع بملف – متحرك مقترن مع بوق. عندما يصمم –بشكل جيد فإن مساحة النهاية الكبرى للبوق، والتي تسمى "الفم أو الفوهة" تكون كبيرة بالشكل الكافي الذي يشع الصوت بكفاءة عند أقل تردد مرغوب. للنهاية الصغرى من البوق، والتى تسمى " الزور"، مساحة تختاره لتتوافق مع المعاوقة الصوتية لوحدة الدفع ولتولد تشوه غير خطى في الإشارة الصوتية يكون صغيرا كلما أمكن.

تستعمل سماعات البوق بشكل واسع الانتشار في السينمات، المسارح، قاعات الحفلات الموسيقية، الملاعب، والصالات حيث يجب أن تشع قدرة صوتية كبيرة وحيث يكون التحكم في اتجاه إشعاع الصوت مرغوب. تم بيان أن كفاءة إشعاع الصوت من جانب واحد من السماعة ذات المشعاع المصممة بشكل جيد في الأبواب 7 و8 تكون بضع أجزاء في المائة. بالمقارنة، فإن كفاءة الإشعاع من سماعة البوق تقع في العادة بين 10 و50 في المائة. العيوب الأساسية لسماعات البوق مقارنة مع سماعات المشعاع – المباشر هي التكلفة الأعلى، والحجم الأكبر.

قبل الخوض في تحليل سماعة البوق، يجب أن يذكر مرة ثانية أن كفاءة سماعة المشعاع – المباشر يمكن زيادتها عند الترددات المنخفضة عن طريق تثبيت الكثير من الوحدات جنبا إلى جنب لتكون حاجز واحد.

التفاعل المتبادل بين الوحدات المشعة يعمل على زيادة المقاومة الإشعاعية لكل وحدة بشكل كبير. على سبيل المثال، السماعتان المتماثلتين ذات المشعاع – المباشر الموضوعتان متقاربتين جدا في حاجز مستوى كبير لانهائى وتهتزان في طور واحد، سوف تولد شدة عند المحور الرئيسى قدرها

أربعة مرات مثل الشدة المتولدة بسماعة واحدة منهما.

لا تكون سماعات المشعاع – المباشر المستعملة في الأغراض المتعددة في أغلب الأحيان مرضية عند الترددات العالية مثل سماعة البوق الواحد بسبب صعوبة الحصول على ظروف طور موحد من حجابات المشعاع – المباشر المختلفة. معنى ذلك أن، ظروف اهتزاز سماعة البوق تكون معقدة، لدرجة أن التغيرات الطبيعية في توحيد الأبواق تولد فروق كبيرة في أطوار الإشارات المشعة للأبواق المختلفة عند الترددات العالية. النتيجة هي تولد منحنى استجابة ونموذج توجيهية شاذة ومتقلبة جدا.

لا تنشئ هذه المشكلة مع البوق حيث يتم استخدام وحدة دفع واحدة فقط. عندما تستخدم وحدتين دفع أو أكثر لدفع بوق واحد، فإن مدى التردد الذي لا يتأثر فيه منحنى الاستجابة عكسيا بتعدد الوحدات الدافعة يكون ذلك المدى حيث يتذبذب الحجاب الحاجز في طور واحد.

2.9 الدائرة الكهرو – ميكانو – صوتية[1]

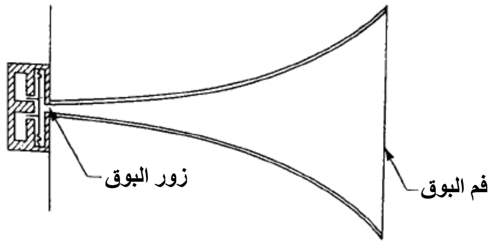
الوحدة الدافعة لسماعة البوق تكون في الأساس سماعة بمشعاع – مباشر صغير يقترن زور بوق مندلع كالمبين في الشكل 1.9. في الجزء التالى سوف نناقش السمات المميزة للبوق نفسه. في الفقرة التالية سوف نحصر أنفسنا في هذا الجزء من مدى التردد حيث تكون المعاوقة الميكانيكية المركبة Z_{MT} لزور البوق عبارة عن مقاومة نقية على الصورة،

$$Z_{MT} = \frac{1}{z_{MT}} = \rho_o c\, S_T \qquad \text{سلطان } 9\text{-}1$$

حيث ρ_o كثافة الهواء بالكيلوجرام للمتر المكعب، c سرعة الصوت بالمتر لكل ثانية، $\rho_o c$ تساوى 406 أوم في م كجم ث عند $22^o\,C$ و 10^5 نيوتن للمتر المربع ضغط جوى، S_T مساحة الزور بالمتر المربع، و z_{MT} المطاوعة الميكانيكية عند زور البوق بالمأوم الميكانيكى في م كجم ث (أوم حركية).

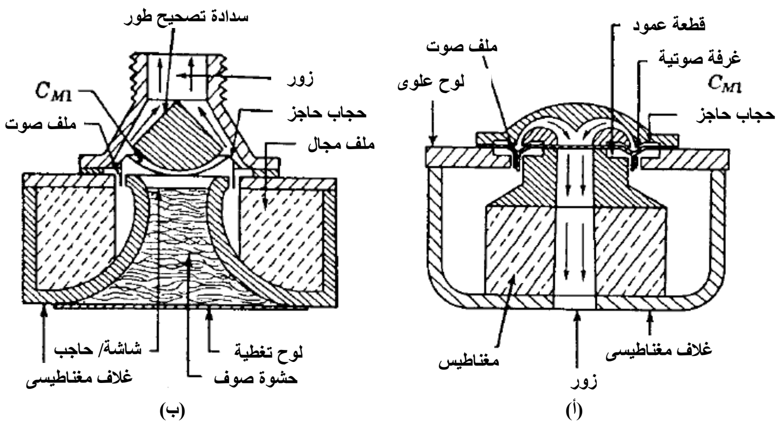
يبين الشكل 2.9 مخططات مقطعية في وحدتين من وحدات الدفع النموذجية لسماعات البوق. تملك كل منها حجاب حاجز وملف صوت بكتلة كلية M_{MD}، ومطاوعة ميكانيكية C_{MS}

ومقاومة ميكانيكية $R_{MS} = 1/r_{MS}$. الكمية Υ_{MS} هي المستجيبية الميكانيكية للحجاب بالمأوم (أوم حركية).



الشكل 1.9 مقطع عرضى لسماعة بوق نموذجى له مقطع آسى. في هذا التصميم، يكون نصف قطر الزور 0.2، نصف قطر الفم 3.4، والطول 5.0 (وحدة اختيارية).

خلف الحجاب يكون فضاء يكون في العادة مملوء بمادة صوتية. عند الترددات المنخفضة يعمل هذا الفضاء كمطاوعة C_{MB} يمكن أن تجمع مع مطاوعة الحجاب. عند الترددات العالية تصبح مفاعلة هذا الفضاء صغيرة بحيث يصبح الفضاء خلف الحجاب مقاومة إشعاعية ميكانيكية $R_{MB} = 1/r_{MB}$ لها أيضا المقدار المعطى في المعادلة 1.9. تتحد هذه المقاومة مع المقاومة الإشعاعية الميكانيكية للزور، والحجاب يجب أن يمد القدرة إلى كل من جانبه الأمامى والخلفي . من الواضح أن أى قدرة تظهر خلف الحجاب تكون مبددة، وعند الترددات العالية تصبح هذه القدرة أحيانا كبيرة وتصل إلى نصف القدرة الصوتية الكلية المتولدة.



الشكل 2.9 مقاطع عرضية في وحدتي دفع نموذجية. يقترن الحجاب الحاجز مع زور البوق من خلال تجويف له مطاوعة ميكانيكية C_{M1} .

يوجد أمام الحجاب فضاء هوائى له مطاوعة C_{M1} . عند الترددات المنخفضة يتصرف الهواء في هذا الفضاء مثل سائل غير قابل للانضغاط، أى أن ωC_{M1} تكون صغيرة، وكل المزاح بواسطة الحجاب يمر إلى زور البوق. عند الترددات العالية تصبح المفاعلة الميكانيكية لهذا الفضاء الهوائى منخفضة بشكل كبير (أى أن الهواء يصبح قابل للانضغاط) بحيث لا يمر كل الهواء المزاح بالحجاب إلى زور البوق. لملف الصوت مقاومة كهربية R_E ومحاثة كهربية L . وكما قيل من قبل، z_{MT} هي الحركية الميكانيكية عند زور البوق.

بالتدقيق، نرسم الدائرة المناظرة من نوع – الحركية المبينة في الشكل 9ـ3. في هذه الدائرة " تتدفق " القوى خلال العناصر و" تهبط " السرعة خلالها. جهد الدائرة – المفتوحة للمولد والمقاومة تكون e_g و Eg على الترتيب. التيار الكهربى يكون i ، والسرعة الخطية لملف الصوت والحجاب هي u_c ، والسرعة الخطية للهواء عند زور البوق u_T ، والقوة عند زور البوق تكون f_T . كما من قبل، مساحة الحجاب تكون S_D ، ومساحة الزور تكون S_T .

9ـ3 كفاءة القدرة الكهربية المتاحة.

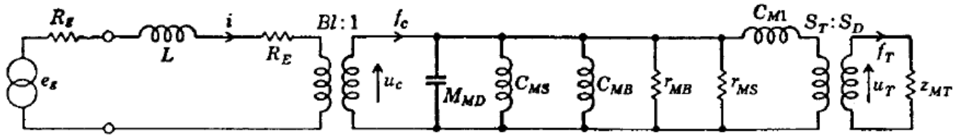
في مدى التردد – المتوسط يمكن في العادة عمل الكثير من التقريبات لتبسيط الدائرة التناظرية في الشكل 9ـ3. بسبب أن وحدة الدفع تكون صغيرة جدا، فإن كتلة الحجاب وملف الصوت M_{MD} تكون صغيرة جدا. هذا بدورة في العادة يعنى أن مطاوعة التعليق C_{MS} تكون كبيرة لكى تحفظ تردد الرنين منخفض. أيضا، تكون مستجيبية التعليق Υ_{MS} تكون كبيرة في العادة، وتكون المفاعلة ωC_{M1} صغيرة. بالتالى، في مدى التردد هذا، تختزل الدائرة في الأساس إلى الشكل 9ـ4أ، حيث تكون المستجيبية خلف الحجاب على الصورة،

$$r_{MB} \equiv \frac{1}{\rho_o c S_D} \quad \text{mks acoustic mohms} \qquad \text{سلطان } 9\text{-}2$$

مع تغير المساحة وإزالة المحولات الكهروميكانيكية، نحصل على الشكل 9ـ4ب، حيث تكون مستجيبية الإشعاع على الصورة،

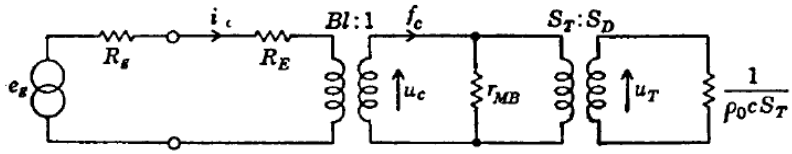
$$r_{MT} \equiv \frac{S_T}{\rho_o c S_D{}^2} \quad \text{mks acoustic mohms} \qquad 9\text{-}3$$

سلطان

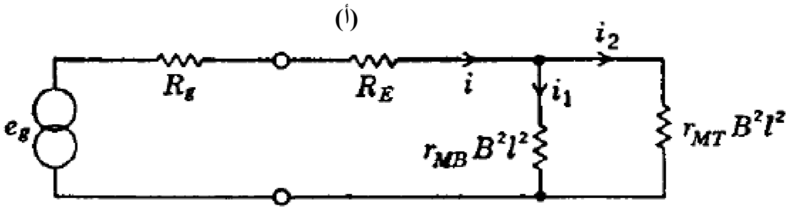


الشكل 3.9 دائرة تناظرية كهرو – ميكانو – صوتية من نوع – الحركية لوحدة دفع، بفرض أن المعاوقة الميكانيكية لزور ل–البوق هي $\rho_o cS_T$، بمعنى أن الحركية الميكانيكية تكون $Z_{MT} = 1/\rho_o cS_T$.

كما قيل من قبل، فإن S_T مساحة الزور و S_D مساحة الحجاب بالمتر المربع. افترضنا هنا أن التجويف خلف الحجاب في مدى التردد هذا يكون ممتصا بالكامل تقريبا، الأمر الذي لا يكون حقيقي دائما. لكن، عادة، تصلح هذه الدائرة على مدى كبير من الترددات لأن الاضمحلال الشديد بواسطة مستجيبية بالبوق r_{MT}. أيضا، r_{MT} يكون عادة أصغر من r_{MB} بحيث تذهب معظم القدرة الممدودة بواسطة الحجاب إلى البوق.



(أ)



(ب)

الشكل 4.9 دوائر تناظرية مبسطة لوحدة الدفع من نوع الحركية في المنطقة حيث يكون الحجاب محكوم – بالمقاومة بواسطة البوق.

الحل للشكل 4.9ب يعطينا التيار المرجعي $i = i_{ref}$ على الصورة،

$$i = i_{ref} = \frac{e_g}{(R_g + R_E) + \dfrac{B^2 l^2 S_T}{S_D{}^2 \rho_o c\,(1 + S_T / S_D)}} \qquad 9\text{-}4$$

تكون أقصى قدرة كهربية متاحة من المولد إلى السماعة، بفرض R_g ثابت، على الصورة،

$$\text{Max power available} = \frac{{e_g}^2}{4R_g} \qquad \text{معادلة } 9\text{-}5$$

كفاءة القدرة المرجعية المتاحة (PAE_{ref})

كفاءة القدرة المرجعية المتاحة تساوى القدرة المرجعية المسلمة للبوق، $|i_2|^2 B^2 l^2 r_{MT}$، مضروبة في 100 ومقسومة على أقصى قدرة كهربية متاحة.

$$\begin{aligned} PAE_{ref} &= \frac{|i|^2_{ref}\, r_{MB} / (r_{MT} + r_{MB})^2\, r_{MT} B^2 l^2}{{e_g}^2 / 4R_g} \times 100 \\ &= \frac{400\, |i|^2_{ref}\, R_g\, r_{MT} B^2 l^2}{(1 + S_T / S_D)^2\, {e_g}^2} \end{aligned} \qquad \text{معادلة } 9\text{-}6$$

من المعادلات 9ـ3، 9ـ4، 9ـ6 نحصل على،

$$PAE_{ref} = \frac{400 R_g\, r_{MT} B^2 l^2}{\left[B^2 l^2 r_{MT} + (R_g + R_E)(1 + S_T / S_D)\right]^2} \qquad \text{معادلة } 9\text{-}7$$

9ـ4 الاستجابة الترددية

تتعين الاستجابة الترددية لسماعة بوق كاملة، في المدى حيث تكون معاوقة زور البوق عبارة عن مقاومة مثل المعطاة بالمعادلة 9ـ1، بحل دائرة الشكل 9ـ3. بغرض التحليل، سوف نقسم مدى التردد إلى ثلاثة أجزاء، A ، B ، و C كما هو مبين بالشكل 9ـ5.

منطقة التردد-المتوسط[2].

في منطقة التردد – المتوسط، التى يرمز إليها بالرمز B في الشكل 9ـ5، الاستجابة تساوى كفاءة القدرة المرجعية المتاحة (PAE_{ref}) المعطاة بالمعادلة 9ـ7. هنا، تكون الاستجابة "مستوية" مع التردد، و، لوحدات التردد العالى المعتادة المستخدمة في دور السينما مع ترددات قطع 300 هيرتز، فإن المنطقة المستوية تمتد من فوق 500 هيرتز بقليل إلى أسفل 3000 هيرتز بقليل. في هذه المنطقة،

تكون سرعة الحجاب ثابتة مع التردد، بدلاً من التناقص في التناسب العكسي مع التردد كما كان في حالة سماعة المشعاع – المباشر.

تردد الرنين.

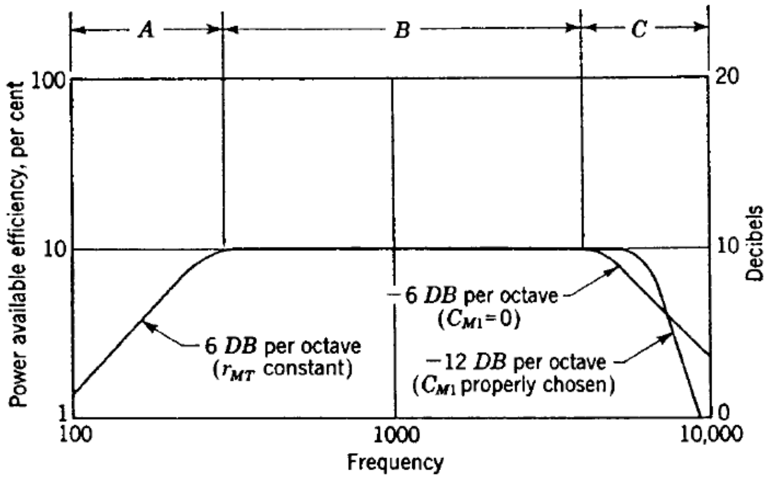
يتضح من المعادلة 9-3 أنه بما أن ωC_{M1} تكون صغيرة، فإن المفاعلة الصفرية سوف تحدث عند التردد حيث،

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{MD}\left[C_{MS}C_{MB}/(M_{MS}+M_{MB}\right]}} \qquad \text{سلطان} 9\text{-}8$$

عمليا، يقع هذا الرنين عادة في المنطقة المتوسطة B في الشكل 9-5 ويضمحل بشدة بواسطة المستجيبية r_{MT}، لذلك تكون سرعة الحجاب محكومة – بالمقاومة.

الترددات المنخفضة

عند الترددات الأسفل بكثير سوف تهبط الاستجابة بمعدل 6 ديسيبل لكل أوكتاف تناقص في التردد إذا كانت معاوقة الزور مقاومة كما هي معطاة بالمعادلة 9-1. تم بيان هذه الحالة بالمنطقة A في الشكل 9-5.



الشكل 9-5 كفاءة القدرة المتاحة لوحدة دافعة لبوق، في منطقة التردد حيث تكون المعاوقة الميكانيكية للبوق عند الزور مقاومة نقية $\rho_o c S_T$. المحور الرأسي عبارة عن تدريج لوغاريتمي، يتناسب مع الديسيبل.

لكن، عمليا، معاوقة الزور Z_{MT} للبوق بالقرب من التردد الأدنى الذي عنده يكون إشعاع الصوت مرغوبا لا تكون مقاومة. بالتالى، فإن المنطقة A تحتاج المزيد من الدراسة بعناية.

دعنا نبسط الشكل 3.9 لكى يصلح فقط لمنطقة التردد – المنخفض، الأقل بكثير من تردد رنين الحجاب. حينئذ فإن المحاثة L ، الكتلة M_{MD} ، المطاوعة C_{M1} ، والمستجيبيات r_{MS} و r_{MB} كلها يمكن أن تنحدر من الدائرة، وتعطينا الشكل 6.9.

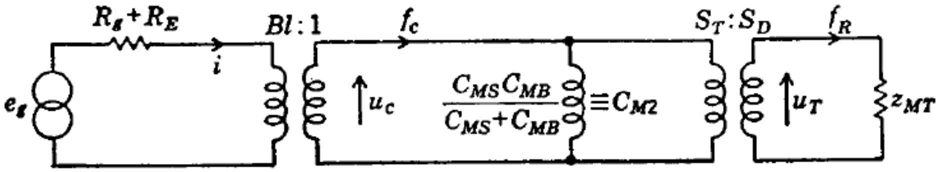
بالحل للحركية الميكانيكية عند الحجاب لوحدة الدفع نحصل على،

$$z_{Mc} = \frac{u_c}{f_c} = \frac{j\omega C_{M2}(S_T/S_D)^2 z_{MT}}{j\omega C_{M2} + (S_T/S_D)^2 z_{MT}}$$ سلطان 9-9

حيث

$$C_{M2} = \frac{C_{MS}C_{MB}}{C_{MS} + C_{MB}}$$ 9-10

و z_{MT} هي الحركية الميكانيكية عند زور بوق له مساحة S_T .



الشكل 6.9 دائرة مناظرة لوحدة دفع البوق في المنطقة حيث سوف يكون الحجاب محكوم –بالجسوء إذا كانت حركية البوق لانهائية. القيمة الفعلية للحركية الميكانيكية للبوق عند الزور تكون z_{MT} .

المعاوقة الميكانيكية لحجاب الوحدة الدافعة تكون عبارة عن مقلوب z_{Mc} ،

$$Z_{Mc} = \frac{f_c}{u_c} = \left(\frac{S_D}{S_T}\right)^2 Z_{MT} - j\frac{1}{\omega C_{M2}}$$ سلطان 9-11

حيث $Z_{MT} = 1/z_{MT}$ هي الحركية الميكانيكية عند زور بوق له مساحة S_T .

كما سوف نبين في الجزء التالى، أن المعاوقة الميكانيكية عند زور نوع عادى من الأبواق عند النهاية السفلى لمنطقة التردد المفيدة تساوى مقاومة ميكانيكية على التوالى مع مطاوعة

سالبة. أى أن،

$$Z_{MT} \cong \Re_{MT} + j\frac{1}{\omega C_{MT}} \qquad 9\text{-}12$$

الحرف الألمانى $\Re$ في $\Re_{MT}$ يدل على أن هذه المقاومة تتغير مع التردد. عادة، يكون تغيرها بين الصفر عند الترددات المنخفضة جدا و $\rho_o c S_T$ (كما هي معطاة بالمعادلة 9ـ1) عند بعض الترددات في المنطقة A في الشكل 9ـ5. بالتالى، فإن الحركية $z_{MT} = 1/Z_{MT}$ هي مقاومة على التوالى مع مفاعلة كتلة سالبة. لذلك، في منطقة التردد حيث يكون هذا حقيقى، فإن الجزء المفاعل للمعاوقة Z_{Mc} يمكن أن التخلص منها بوضع (ارجع للمعادلات 9ـ11 و9ـ12)

$$\frac{{S_D}^2}{{S_T}^2}\frac{1}{C_{MT}} = \frac{1}{C_{M2}} = \left(\frac{1}{C_{MB}} + \frac{1}{C_{MS}}\right) \qquad 9\text{-}13$$ سلطان

$$Z_{Mc} = \Re_{MT}\left(\frac{S_D}{S_T}\right)^2 \cong \frac{1}{\Upsilon_{Mc}} \qquad 9\text{-}104$$ سلطان

حيث Υ_{Mc} المستجيبية الصوتية لزور البوق عند الترددات المنخفضة المحولة للحجاب الحاجز.

كفاءة القدرة المتاحة للترددات حيث تعتبر الدائرة التقريبية في الشكل 9ـ6، وحيث تتحقق شروط المعادلة 9ـ13 تكون على الصورة،

$$\mathrm{PAE} = \frac{400 R_g B^2 l^2 \Upsilon_{Mc}}{\left[(R_g + R_E) + B^2 l^2 \Upsilon_{Mc}\right]^2} \qquad 9\text{-}15$$ سلطان

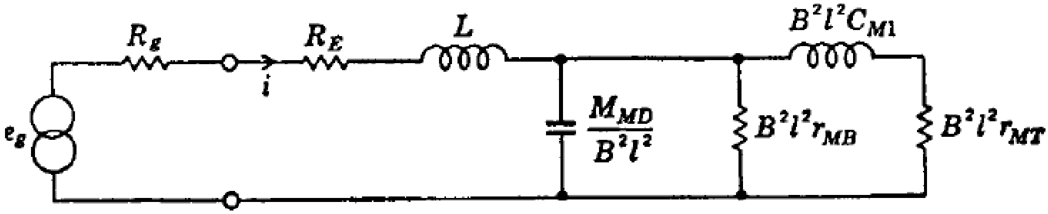
عادة تتغير المستجيبية Υ_{Mc} من "ما لانهاية" عند ترددات منخفضة جدا إلى أسفل إلى $S_T/({S_D}^2 \rho_o c)$ عند بعض الترددات في المنطقة A في الشكل 9ـ5.

الترددات العالية

عند الترددات المنخفضة جدا، تكون الاستجابة محدودة أساسا بالكتلة المشتركة للحجاب وملف الصوت M_{MD}. إذا كانت C_{M1} صفرا، فإن الاستجابة يجب أن تنحدر بمعدل 6 ديسيبل لكل أوكتاف (أنظر المنطقة C في الشكل 9ـ5). من الممكن اختيار C_{M1} لترن مع M_{MD}

عند تردد يجعل الاستجابة تمتد إلى أعلى خلف الحد الذي سوف تمتد إلية إذا كانت محددة بواسطة M_{MD} فقط. يمكننا فهم هذه الحالة باشتقاق دائرة تصلح للترددات العالية كما هو مبين بالشكل 9ـ7. من الواضح أن مضاد رنين مضمحل يحدث عند التردد العلوي المختار. فوق تردد الرنين هذا، تنحدر الاستجابة بمعدل 12 ديسيبل لكل أوكتاف زيادة في التردد (أنظر المنطقة C في الشكل 9ـ5).

بسبب أن تردد الحجاب الرئيسي (المعادلة 9ـ8) يكون مضمحل بشدة بواسطة مقاومة زور البوق، يكون من الممكن مد منطقة الاستجابة المستوية لوحدة الدافع على مدى أربعة أوكتاف بواسطة الاختيار الصحيح لـ C_{M1} عند ترددات أعلى وبواسطة تحقيق شروط المعادلة 9ـ13 عند ترددات أقل.



الشكل 9ـ7 دائرة مناظرة لوحدة دافع بوق عند ترددات عالية حيث تكون مفاعلة كتلة الحجاب أكبر بكثير من مفاعلة المطاوعة له.

9ـ5 أمثلة على حسابات البوق

المثال 9ـ1

كمثال لكفاءة القدرة المتاحة المرجعية لوحدة دافعة لبوق مسرحي ليعمل في مدى التردد فوق 500 هيرتز، دعنا نعوض بقيم نموذجية لثوابت السماعة في المعادلة 9ـ7. عندنا

$$
\begin{aligned}
R_g &= R_E = 24 \text{ ohms} \\
B &= 19{,}000 \text{ gauss} = 1.9 \text{ webers/m}^2 \\
l &= 3.49 \text{ m} \\
B^2l^2 &= 44 \text{ webers}^2/\text{m}^2 \\
S_T &= 3.14 \text{ cm}^2 = 3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \\
S_D &= 28.3 \text{ cm}^2 = 28.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \\
S_T/S_D &= 0.111 \\
S_T/S_D^2 &= 3.14 \times 10^{-4}/(28.3 \times 10^{-4})^2 = 39.2 \text{ m}^{-2} \\
r_{MT} &= 39.2/406 = 0.0965 \text{ mks mechanical mohms [see Eq. (9.3)]}
\end{aligned}
$$

$$\mathrm{PAE_{ref}} = \frac{(400)(24)(0.0965)(44)}{[4.25 + (48)(1.111)]^2} = \frac{40{,}750}{3310} = 12.3\%$$

الحل

لزيادة الـ $\mathrm{PAE_{ref}}$ ، نرى من هذا المثال أن المقاومة الكهربية R_E يجب أن تختزل بقدر المستطاع بدون تقليل الطول l لسلك ملف الصوت. خلال حدود الفضاء المعطى، يمكن عمل هذا بلف ملف الصوت من سلك له مقطع مستطيل بدلا من المقطع الدائرى. هذا يعنى أن كتلة ملف الصوت سوف تزداد. التخفيض الإضافي للمقاومة R_E سوف يتطلب سلك له مساحة مقطع أكبر وهذا يتطلب فجوة هواء أكبر، مع تخفيض مقابل في B . أيضا، يجب ألا يصبح ملف الصوت كبير جدا لأن كتلته سوف تقيد استجابة التردد – العالى. نلاحظ أكثر من ذلك أن قيمة r_{MT} ، وبالتالي النسبة $S_T / S_D{}^2$ ، ربما تبدو أن تكون كبيرة للكفاءة العالية. لكن، إذا أصبحت $S_T / S_D{}^2$ كبير جدا، فإنه بالرجوع إلى الشكل 9-4ب يبين أن قدرة كبيرة جدا سوف تتبدد في r_{MB} وسوف تنخفض الكفاءة. تكون المساومة مطلوبة لإحداث استجابة التردد المطلوب وأقل تكلفة. تحسب قيم S_T / S_D المضبوطة كما سوف نبين في المثال التالى.

المثال 9-2

عين قيمة المساحة القصوى لزور بوق للاستخدام مع الوحدة الدافعة في المثال السابق. أحسب PAE المرجعية لهذه الظروف القصوى.

الحل

دعنا نعبر عن النسبة بين مساحة الزور ومساحة الحجاب على الصورة،

$$a = \frac{S_T}{S_D}$$

حينئذ تصبح المعادلة 9-7 على الصورة،

$$\text{PAE}_{\text{ref}} = \frac{400\, R_g\, a\, B^2 l^2 / \rho_o c S_D}{\left[(R_g + R_E) + a\left(R_g + R_E + \dfrac{B^2 l^2}{\rho_o c S_D} \right) \right]^2}$$

لتعيين أقصى قيمة لـ PAE، نفاضل المعادلة بالنسبة لـ a ونساوى النتيجة بالصفر. تعطى هذه العملية ما يلى،

$$a_{opt} = \frac{R_g + R_E}{R_g + R_E + B^2 l^2 / \rho_o c S_D}$$

بالتحويل نحصل على،

$$\left(\frac{S_D}{S_T} \right)_{opt} = \frac{1}{a_{opt}} = 1 + \frac{B^2 l^2}{(R_g + R_E) \rho_o c S_D}$$

بالتعويض بالثوابت من المثال السابق نحصل على،

$$\left(\frac{S_D}{S_T} \right)_{opt} = 1 + \frac{44}{(48)(406)(28.3) \times 10^{-4}} \approx 1.8$$

أو $a_{opt} = 0.555$ ، وبالتالى،

$$(S_T)_{opt} = \frac{28.3 \times 10^{-4}}{1.8} = 15.7 \times 10^{-4} \quad \text{m}^2$$

بالتعويض عن $a = 0.555$ في معادلة PAE السابقة نحصل على،

$$PAE_{ref} = \frac{(400)(24)(0.555)(44) \times 10^4}{(406)(28.3)\left[48 + 0.555\left(48 + \dfrac{44 \times 10^4}{(406)(28.3)} \right) \right]^2}$$

$$= \frac{20.4 \times 10^4}{[48 + 48]} = 22.1\%$$

بالمقارنة مع المثال السابق، نرى أنه بالاختيار الصحيح لمساحة الزور، نكون قادرين تقريبا على مضاعفة الكفاءة المرجعية (للتردد ـ المتوسط). علاوة على ذلك، دعنا نرى ماذا يحدث إذا تم جعل مقاومة الخرج لمكبر القدرة منخفضة جدا ($R_g = 1$ ohm مثلا)،

$$\frac{S_D}{S_T} \approx 2.54$$

أو

$$S_T = \frac{28.3\times10^{-4}}{2.54} = 11.1\times10^{-4}\quad \mathrm{m}^2$$

و

$$\mathrm{PAE}_{\mathrm{ref}} = \frac{6.04\times10^{2}}{(25+24.9)^2} = 2.4\%$$

تبين هذه النتيجة أنه في حالة أقصى كفاءة فإن معاوقة المكبر يجب أن تساوى بالتقريب معاوقة السماعة.

الجزء الثانى والعشرون – الأبواق

6.9 وصف عام

البوق في الواقع هو محول صوتى. يقوم البوق بتحويل حجاب المساحة- الصغيرة إلى حجاب المساحة – الكبيرة بدون مشاكل رنين البوق التى تمت مناقشتها في الجزء الثامن عشر. لحجاب المساحة – الكبيرة معاوقة إشعاعية تكون أكثر مقاومية على مدى التردد المرغوب من المعاوقة الإشعاعية لحجاب المساحة – الصغيرة (أنظر الشكل 3.5). يترتب على ذلك، أن قدرة أكبر تشع عند ترددات منخفضة لسرعة حجمية معينة للهواء.

عند تصميم البوق لتطبيق معين نرغب دائما في اختيار المتغيرات التى معها تشع أقصى مقدار من القدرة الصوتية على مدى التردد المرغوب مع تشوه غير خطى منخفض بشكل مناسب. بمجرد أن نحدد مدى التردد، التشويه المحتمل، القدرة المشعة المرغوبة، فإنه يمكننا أن نختار الوحدة الدافعة وبعد ذلك تمضي في حساب أقطار الزور والفم وطول وشكل البوق.

7.9 حجم الفم

يجب أن يكون للنهاية الكبيرة (فم) للبوق محيط كبير بشكل كافي بحيث تكون المعاوقة الإشعاعية مقاومية تقريبا على مدى التردد المطلوب. بالإشارة إلى الشكل 3.5 يتبن أن ذلك يكون حقيقى عند $ka > 1$، بمعنى أن $C/\lambda > 1$، حيث C محيط فم البوق و λ الطول الموجى لأدنى نغمة يكون مطلوب إشعاعها. إذا لم يكن فم البوق دائرى بل مربع، فإنه سيتصرف تقريبا

بنفس الطريقة، فيما يتعلق بالقدرة المشعة، مثل الفم الذي له مساحة مساوية. بالتالى، من أجل التصميم الجيد، فإن محيط الفم C ومساحته S_M يجب أن تكون،

$$C = 2\sqrt{\pi S_M} > \lambda \qquad 9\text{-}16$$

حيث λ هو أطول طول موجى للصوت المطلوب إشعاعه بكفاءة.

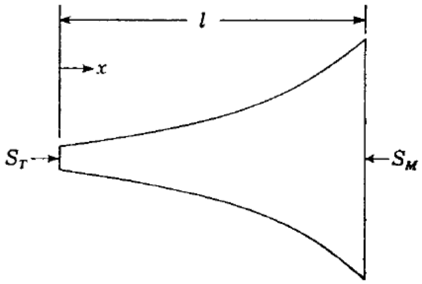
8.9 الأبواق الآسية

أنوع كثيرة من المقاطع الطولية تكون ممكنة للبوق. من الممكن أن يكون قطع مكافئ (إهليجى)، مخروطى، زائدى المقطع، أو أحد الأشكال الأخرى. لكى يكون البوق محول مقبول، فإن مساحة مقطعه العرضية بالقرب من الفم يجب أن تتزايد بالتدريج مع المسافة x (أنظر الشكل 8.9). إذا كان الأمر كذلك، فإن نسبة التحويل تظل ثابتة بشكل كبير مع التردد على مدى واسع.

إن أكثر الأشكال الشائع للمقطع الطولى الذي يحقق المتطلبات هو الشكل الآسى، المبين بالشكل 8.9. بالنسبة لهذا الشكل، فإن مساحة المقطع العرضى عند أى نقطة x على امتداد المحور تعطى بالعلاقة،

$$S = S_T\, e^{mx} \qquad 9\text{-}17$$

حيث S مساحة المقطع العرضى عند x بالمتر المربع، S_T مساحة المقطع العرضى للزور بالمتر المربع، m ثابت الاتساع نحو الخارج (flare) بوحدات مقلوب المتر، x المسافة من الزور بالمتر.



الشكل 8.9 بوق بمقطع آسى. مساحة الفم S_M تساوى $S_T e^{ml}$، حيث m ثابت الاتساع نحو الخارج بوحدات مقلوب المتر، l طول البوق بالمتر، و S_T مساحة المقطع العرضى للزور بالمتر المربع.

إذا كان طول البوق عدد من الأطوال الموجية وكان محيط الفم أكبر من الطور الموجى، يمكننا أن نطلق على البوق "لانهائى" الطول. هذا التبسيط يقود لتساؤلات سهلة الفهم وبشكل عام تكون مفيدة في التصميم.

اعتبارات نظرية

تكون المعادلة التفاضلية العامة لانتشار الصوت في بوق آسى له طول l لانهائى تكون على الصورة،

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 m \frac{\partial p}{\partial t} - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0 \qquad \text{9-18}$$ سلطان

حيث p ضغط الصوت عند نقطة على امتداد طول البوق. (يفترض أن الضغط يكون متجانس عبر المقطع العرضى للبوق.) c سرعة الصوت، m ثابت الاتساع. من الواضح أن m تعين مقدار الحد الثانى من المعادلة السابقة، والذي يعبر عن المعدل الذي يتناقص عنده ضغط الصوت مع مسافة البوق. عند $m = 0$ ، فإن المعادلة 9-18 تصبح معادلة الانتشار في أنبوبة أسطوانية، أى بوق له ثابت اتساع يساوى صفر.

يكون حل المعادلة 9-18 في الحالة الثابتة على الصورة،

$$p(t) = P_+ e^{-mx/2}\ e^{-jx\sqrt{4k^2 - m^2}/2}\ e^{j\omega t} \qquad \text{9-19}$$ سلطان

حيث

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \qquad \text{9-20}$$ سلطان

تكون السرعة الحجمية U عند أى نقطة x (انظر الشكل 2-58)

$$U = \frac{S}{j\omega\rho_o}\left[\frac{m}{2} + j\frac{\sqrt{4k^2 - m^2}}{2}\right]p \qquad \text{9-21}$$ سلطان

المعاوقات

تكون المعاوقة الصوتية Z_A عند أى نقطة x على طول البوق حيث تكون مساحة المقطع العرضى S على الصورة،

$$Z_A = \frac{p}{U} = \frac{2J\omega\rho_o}{S(m + j\sqrt{4k^2 - m^2})}$$

$$= \frac{\rho_o c}{S}\sqrt{1 - \frac{m^2}{4k^2}} + j\frac{\rho_o cm}{2kS} \qquad \text{mks mechanical ohms}$$ سلطان9-22

عند الزور، حيث $S = S_T$ ، فإن المعاوقة الميكانيكية $Z_{MT} = Z_{AT} S_T{}^2$ تكون على الصورة،

$$Z_{MT} = \frac{f}{u} = \rho_o c S_T \sqrt{1 - \frac{m^2}{4k^2}} + j\frac{\rho_o cmS_T}{2k}$$

$$\equiv R_{MT} + j\frac{1}{\omega C_{MT}} \qquad \text{mks mechanical ohms}$$ سلطان9-23

تكون الحركية الصوتية $z_A = 1/Z_A$ عند الزور على الصورة،

$$z_{AT} = \frac{U}{p} = \frac{S_T}{\rho_o c}\sqrt{1 - \frac{m^2}{4k^2}} - j\frac{S_T m}{2\rho_o ck} \qquad 9\text{-}24$$

الاجزاء الحقيقى والتخيلى لـ Z_A و z_A تتصرف بشكل متشابه مع التردد وبشكل مختلف فقط بواسطة مقدار $(S/\rho_o c)^2$ وإشارة الجزء التخيلى. لاحظ أن هذا الاستنتاج لا يقتصر على المقطع العرضى الدائرى. سوف يتم دراسة القيود على شكل المقاطع العرضية لاحقا. دعنا نرى فيما يلى كيف يؤثر تغير ثابت الاتساع m على المعاوقة الصوتية Z_A عند أى نقطة على امتداد البوق حيث تكون المساحة هي S .

ثابت الاتساع ومعاوقة الزور

عندما يكون ثابت الاتساع m أكبر من 4π مقسومة على الطول الموجى ، $m > 2k$ ، ترددات منخفضة)، فإن المقاومة الصوتية R_{AT} ، والمفاعلة الصوتية X_{AT} عند زور البوق حيث تكون المساحة هي S_T ، تكونا على الصور،

$$R_{AT} = 0$$

$$X_{AT} = \frac{\rho_o c}{S_T}\left(\frac{m}{2k} - \sqrt{\frac{m^2}{4k^2} - 1}\right) \qquad 9\text{-}25$$

عندما يكون ثابت الاتساع m أكبر من 4π مقسومة على الطول الموجى فإن المقاومة والمفاعلة

الصوتية تكونا،

$$R_{AT}=0$$

$$X_{AT}=\frac{\rho_o cm}{2kS_T}=\frac{\rho_o c}{S_T}$$ سلطان9-26

في كل الحالات حيث $m>4\pi/\lambda$ أو $m<2k$ ترددات مرتفعة، فإن المقاومة والمفاعلة الصوتية عند أى نقطة x على امتداد البوق حيث تكون المساحة هي S هي،

$$R_{AT}=\frac{\rho_o c}{S_T}\sqrt{1-\frac{m^2}{4k^2}}$$

$$X_{AT}=\frac{\rho_o cm}{2kS_T}=\frac{\rho_o c^2 m}{2\omega S_T}\equiv\frac{1}{\omega C_{AT}}$$ سلطان9-27

حيث $C_{AT}=2S_T/\rho_o c^2 m$.

عند الترددات العالية جدا، تقترب المفاعلة من الصفر وتقترب المقاومة من $\rho_o c/S_T$ أو $\rho_o c/S$ بوجه عام. هذه أيضا هي المعاوقة الكهربائية لموجة صوتية تقدمية مستوية في أنبوب له مقطع عرضي منتظم S.

تردد القطع

تحدث الحالة الخاصة لـ $m=4\pi/\lambda$ عند التردد الذي سوف نرمز له بالرمز f_c ، حيث

$$f_c=\frac{mc}{4\pi}$$ سلطان9-28

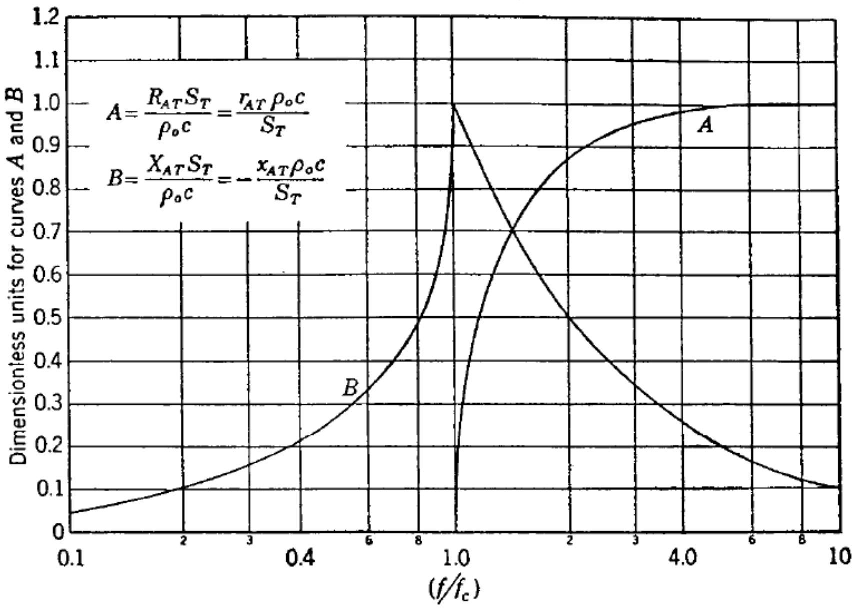
يسمى هذا التردد f_c بتردد القطع لأنه بالنسبة للترددات الأكبر منه سوف لا ترسل قدرة أسفل إلى البوق، بمعنى أن المعاوقة عند كل المواضع على امتداد البوق تكون عبارة عن مفاعلة نقية (أنظر المعادلة 9ـ25).

للحصول على المعاوقة الصوتية عند زور البوق بدلالة تردد القطع، نلاحظ أن $f_c/f=m/2k$. بالتعويض في المعادلة 9ـ22 نحصل على،

$$Z_{AT}=\frac{\rho_o c}{S_T}\left(\sqrt{1-\left(\frac{f_c}{f}\right)^2}+j\frac{f_c}{f}\right)=R_{AT}+j\,X_{AT} \qquad \text{سلطان 9-29}$$

حيث S_T مساحة الزور بالمتر المربع، $\rho_o c$ المعاوقة المميزة للهواء بالرايليى في م كجم ث، f_c تردد القطع، و f تردد الدفع.

تم بيان رسومات الكميتان A و B ، اللتان تتناسبا طرديا مع الأجزاء المقاومية والمفاعلية من المعاوقة الصوتية عند زور بوق آسى لانهائي الطول، في الشكل 9.9. الكميات A و B ، تناسبا طرديا أيضا مع الأجزاء الحقيقية والتخيلية للحركية الصوتية عند الزور. تم إعطاء العلاقات التى تربط بين A ، B ، R_{AT} ، X_{AT} ، r_{AT} و x_{AT} على الرسم.



الشكل 9.9 رسم الكميات A و B ، المعرفة بالعلاقات الموجودة على الرسم.

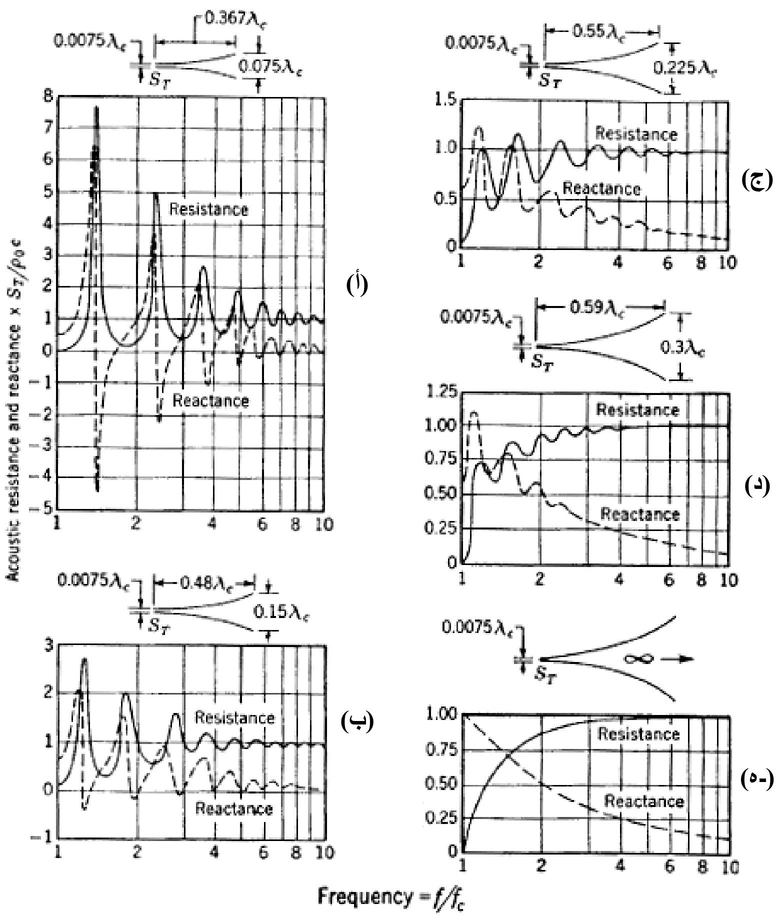
عند التردد الأكبر من ضعف تردد القطع f_c تقريبا، فإن معاوقة الزور تكون مقاومية بشكل أساسي وتكون قريبة جدا من قيمتها العظمى في المقدار.

<u>البوق المحدد الطول</u>

معادلة المعاوقة الصوتية عند زور بوق آسى له طول محدد تكون كما هي معطاة بالمعادلة 5.80.

يجب استخدام معادلة للحسابات المضبوطة، تكون معقدة عن تلك التى يجب أن تستعمل حينما يكون قطر الجرس ليس كبير أو عندما يكون طول البوق قصير. لبيان ماذا تعنى كلمة "قطر جرس كبير" و"طول طويل، دعنا نشير إلى الشكل 10-9.

إذا كان محيط فم (فوهة) البوق مقسوم على الطول الموجى أقل من 0.5 تقريبا (بمعنى أن قطر الفم مقسوم على الطول الموجى أقل من 0.16 تقريبا)، فإن البوق يرن مثل أنبوبة أسطوانية، أى عند مضاعفات التردد حيث يكون الطول مساويا لنصف الطول الموجى. تظهر هذه الحالة بوضوح بواسطة ترددين الرنين السفليين في الجزء (أ) من الشكل 10-9.



الشكل 10-9 منحنيات تبين التغير في المعاوقة الصوتية النوعية عند زور أربعة أبواق آسية كدالة في التردد مع قطر الجرس كمتغير. تكون محيطات الجرس هي (أ) $C = 0.236\lambda$، (ب) $C = 0.47\lambda$، (ج)

عندما يكون محيط فم البوق مقسوم على الطول الموجي أكبر من 3 تقريبا (بمعنى أن قطر الفم مقسوم على الطول الموجي أكبر من 1.0 تقريبا)، فإن البوق يعمل تقريبا كبوق لانهائي. تظهر هذه الحالة بوضوح بمقارنة الشكل 9ـ10د والشكل 9ـ10هـ في المنطقة التي يكون فيها f / f_c أكبر من 2 تقريبا، وهي الحالة التي يكون فيها قطر الفم مقسوم على الطول الموجي أكبر من 0.5.

في منطقة التردد حيث تقع نسبة محيط فم البوق إلى الطول الموجي بين 1 و3 تقريبا، فإنه يجب استخدام المعادلة الدقيقة للبوق الآسي المحدد (المعادلة 5ـ80)، أو أن النتائج يمكن أن تحسب من الأشكال 9ـ10 ب و9ـ10 ج.

$C = \infty$ (و(هـ)، $C = 0.94\lambda$ (د)، $C = 0.71\lambda$

عندما يصبح طول البوق أقل من ربع الطول الموجي فإنه يمكن أن يعالج كمساحة بسيطة غير متصلة مثل التى تمت مناقشتها في الفصل 5ـ11. من الواضح أنه، إذا ما اختار أحد ما مساحة فم معينة ومساحة زور معينة للحصول على أقصى كفاءة، فإن طول البوق يوضع بشكل آليا بواسطة ثابت الاتساع m، والذي بدوره يعتمد طرديا بناء على تردد القطع.

التشوه غير الخطي

تولد موجة الصوت تمدد وانضغاط للهواء الذي تسافر فيه. نجد من المعادلة 6ـ2 أن العلاقة بين الضغط وحجم " صندوق " من الهواء عند $20^o C$ الذي خلاله تمر الموجة الصوتية تكون على الصورة،

$$P = \frac{0.726}{V^{1.4}} \qquad \text{9-30}$$

حيث $V = 1/\rho_o$ هو الحجم النوعى للهواء بوحدات المتر المكعب/كجم، P الضغط المطلق بوحدات البار حيث 1 بار يساوى 100000 نيوتن/م^2. تم رسم هذه المعادلة بالمنحنى AB في الشكل 9ـ11.

بفرض أن إزاحة حجاب الوحدة الدافعة عبارة عن إزاحة جيبية، فإنه يعمل على تغيير حجم الهواء

القريب منه بشكل جيبى. بالنسبة للتغيرات الكبيرة في الحجم، فإن الضغط الناشئ في زور البوق لم يعد جيبى، كما يمكن رؤيته من الشكل 9ـ11. تسافر موجة الضغط المتولدة بهذا الشكل بعيدا عن الزور نحو الفم.

إذا كان البوق ببساطة عبارة عن أنبوب اسطواني طويل، فإن التشوه سوف يزيد على نحو إضافي الموجة المتقدمة طبقا للصيغة[3,4]،

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\gamma+1}{\sqrt{2}\,\gamma} k \frac{p_1}{p_o} x = 1.21 k \frac{p_1}{p_o} x \qquad \text{معادلة } 9\text{-}31$$

حيث p_1 ج م م ضغط الصوت للتردد الأساسى بالنيوتن لكل متر مربع، حيث p_2 ج م م ضغط الصوت للتوافق الثانى بالنيوتن لكل متر مربع، حيث P_o الضغط الجوى بالنيوتن لكل متر مربع، $k = \omega / c = 2\pi / \lambda$ رقم الموجة بمقلوب المتر، $\gamma = 1.4$ للهواء، و x المسافة التى تسافرها الموجة على امتداد الأنبوبة الأسطوانية بالمتر.

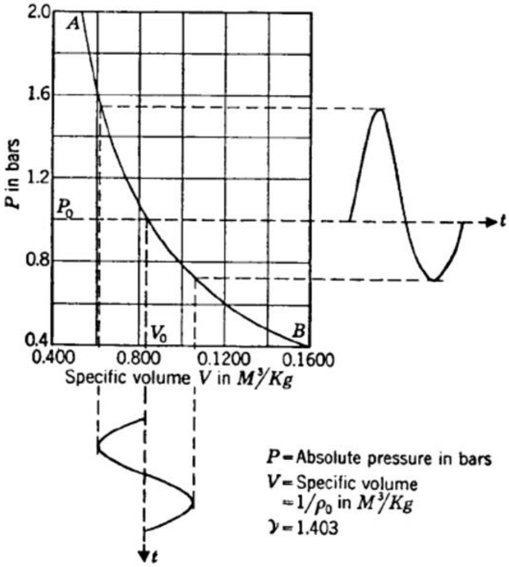
تتعطل المعادلة 9ـ31 عندما يصبح تشوه التوافق – الثانى كبيرا، و يجب استخدام معادلة أكثر تعقيد، لم نقدمها هنا.

في حالة البوق الآسى، فإن سعة الأساسى تتناقص مع سفر الموجة بعيد عن الزور، لذلك فإن تشوه التوافق – الثانى لا تزداد خطيا مع المسافة. بالقرب من الزور يزيد التشوه عما هو معطى بالمعادلة 9ـ 31، لكن بالقرب من الفم فإن سعة ضغط الأساسى يكون عادة منخفض جدا بحيث يحدث تشويه إضافي قليل جدا.

1- يتم إيجاد التشوه المتولد في موجة الصوت بعد ما تسافر مسافة x إلى أسفا بوق آسى في حالة قدرة مستمدة ثابتة لوحدة المساحة من الزور كما يلى: قم بمفاضلة كلا طرفي المعادلة 9ـ 31 بالنسبة إلى x، لكى تحصل على معدل التغير في p_2 مع x عند ثبات p_1. سمى هذه المعادلة 9ـ31أ.

2- في المعادلة 9ـ31أ عوض عن p_1 بالمقدار $p_T e^{-mx/2}$، حيث p_T هي ج م م ضغط الأساسى

عند زور البوق بالنيوتن لكل متر مربع و m هو ثابت الاتساع.



الشكل 11.9 رسم معادلة الغاز $PV^{\gamma}=1.26\times10^{4}$ **، صالحة عند** $20^{o}C$ **. تم بيان الضغط الجوي الطبيعي (** 0.76 m Hg **) على هيئة** $P_o=1$ bar.

3- ثم دع $p_T=\sqrt{I_T\rho_o c}$ ، حيث I_T يكون شدة الصوت عند الزور بالواط لكل متر مربع و $\rho_o c$ هي المعاوقة الصوتية المميزة للهواء بوحدات الرايلي في م كجم ث.

4- كامل كلا طرفي المعادلة الناتجة بالنسبة إلى x . هذا يعطى،

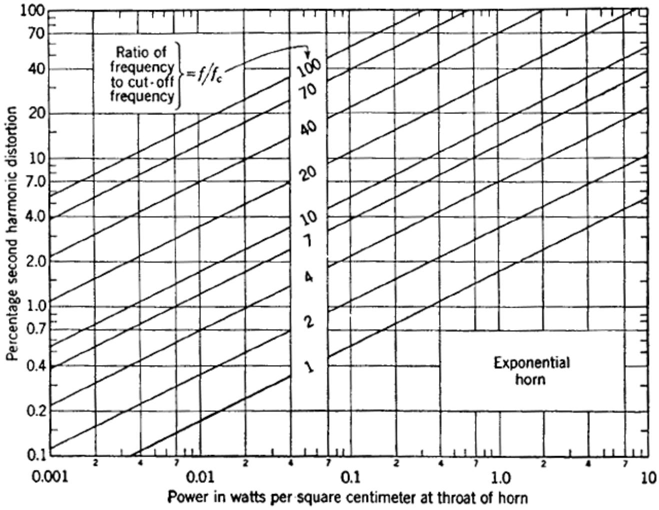
$$\%\ \text{second}-\text{harmonic distortion}=\frac{50(\gamma+1)}{\gamma}\frac{\sqrt{I_T\rho_o c}}{P_o}\frac{f}{f_c}\left[1-e^{-mx/2}\right] \qquad \text{سلطان 9-32}$$

بالنسبة للبوق الآسى اللانهائى الطول، عند الضغط الجوى ودرجة الحرارة الطبيعيين، فإن معادلة التشوه الكلى المدخل إلى الموجة التى تبدأ جيبيا عند الزور تكون

$$\%\ \text{second}-\text{harmonic distortion}=1.73\times\frac{f}{f_c}\sqrt{I_T}\times10^{-2} \qquad \text{سلطان 9-33}$$

حيث f التردد الدافع بالهيرتز، f_c تردد القطع بالهيرتز، و I_T الشدة بالواط لكل متر مربع عند

زور البوق.



الشكل 9ـ12 النسبة المئوية لتشوه التوافق – الثانى لبوق آسى كدالة في الشدة عند زور بوق له نسبة تردد إلى تردد القطع كمتغير.

تم رسم المعادلة 9ـ33 كما هو مبين بالشكل 9ـ12. في الواقع، هذه المعادلة صحيحة تقريبا للأبواق المحددة لأن معظم التشوه يحدث بالقرب من الزور.

تبين المعادلة 9ـ33 أنه لأقل تشوه يجب أن يكون تردد القطع f_c كبير كلما أمكن، وهذا بدوره يعنى أن ثابت الاتساع يجب أن يكون كبير بقدر الإمكان. بمعنى أخر، يجب أن يتسع البوق للخارج بشكل مفاجئ لكى تنخفض الشدة فجأة مع الأبعاد على امتداد البوق نحو الفم.

لسوء الحظ، لا يكون تردد القطع العالى حل سهل للأبواق التى تكون مصممة للعمل على مدى واسع من الترددات. في هذه الحالة، من الضرورى تشغيل البوق عند قدرة منخفضة عند الترددات المنخفضة إذا كان التشوه سيصبح منخفض عند هذه الترددات. يتحقق هذا الهدف بشكل آلى إلى حد ما في إعادة إنتاج الخطاب والموسيقى، لأنه فوق 1000 هيرتز تتناقص الشدة لهذه الأصوات بمعامل 10 تقريبا لكل مضاعفة للتردد.

9ـ9 أنواع أخرى للأبواق

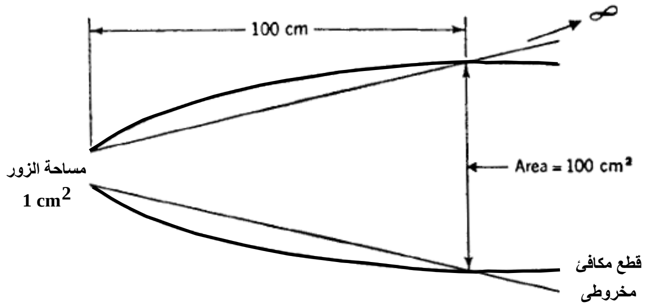
كما ذكرنا من قبل، يمكن استعمال أشكال أخرى من أنواع الأبواق خلاف النوع الآسى.

تتضمن الأنواع التمثيلية كل من الأبواق المخروطية، أبواق القطع المكافئ وأبواق القطع الزائدى (الإطنابية) تكون معادلات هذه الأنواع على النحو التالى.

أبواق القطع المكافئ (أنظر الشكل 13.9)

$$S = S_T x \qquad \text{معادلة } 9\text{-}34$$

حيث S مساحة المقطع العرضى عند x بالمتر المربع، S_T مساحة المقطع العرضى للزور بالمتر المربع.



الشكل 13.9 مقاطع طولية لأبواق مخروطية وقطع مكافئ.

الأبواق المخروطية (أنظر الشكل 13.9)

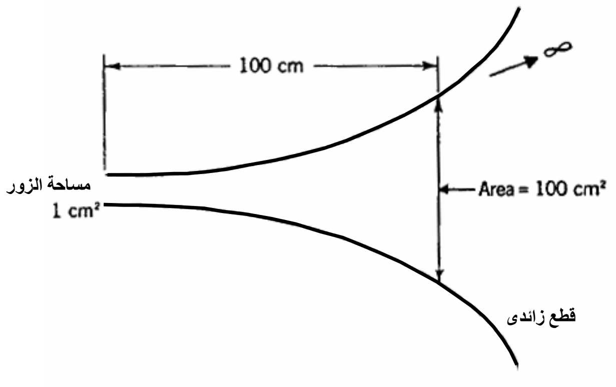
$$S = S_T x^2 \qquad \text{معادلة } 9\text{-}35$$

أبواق القطع الزائدى (أنظر الشكل 14.9)

$$S = S_T\left(\cosh\frac{x}{x_o} + M\sinh\frac{x}{x_o}\right)^2 \qquad \text{معادلة } 9\text{-}36$$

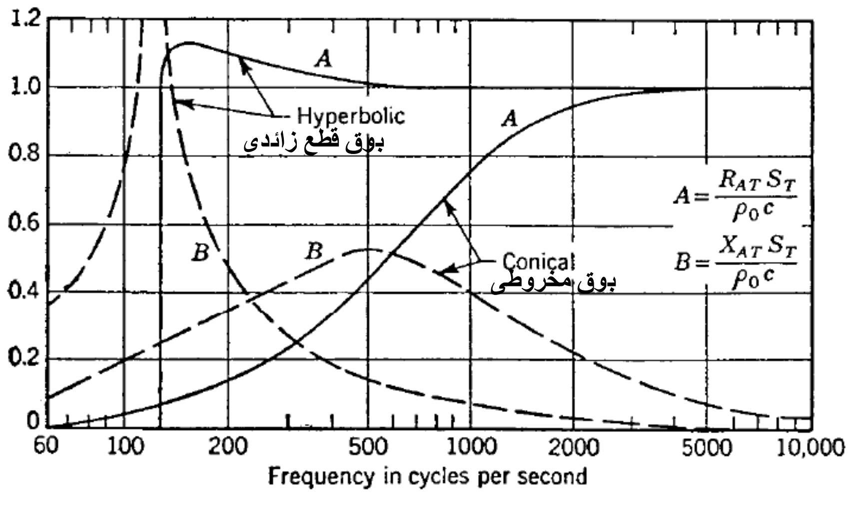
حيث x المسافة المحورية من الزور بالمتر، x_o المسافة المحورية المرجعية من الزور بالمتر، M معامل لا يزيد أبدا عن الوحدة، f_c تردد القطع ويساوى $c/2\pi x_o$ Hz، و c سرعة الصوت بالمتر لكل ثانية.

عند الترددات العالية جدا كل هذه الأنواع تتصرف بشكل مشابهه. مع ذلك، عند التردد المنخفضة توجد اختلافات كبيرة. يمكن بيان هذه الاختلافات بمقارنة معاوقات الزور في كل من البوق المخروطى وبوق القطع الزائد مع نظيرتها في البوق الآسى. في الشكل 15.9 تم بيان معاوقات الزور للنوعين الأولين، بينما تم عرض معاوقة زور البوق الآسى في الشكل 9.9.



الشكل 14.9 مقطع طولى لبوق القطع الزائدى.

لكل أنواع الأبواق تكون مقاومة الزور منخفضة جدا أو صفرا أسفل تردد القطع. فوق تردد القطع، تزداد المقاومة النوعية للزور بشكل فجائى إلى إلى قيمتها النهائية $\rho_o c$ في تلك الحالات حيث يكون معدل التناقص قرب زور البوق صغيرا. على سبيل المثال، المقاومة النوعية لزور بوق قطع زائدى تصل القيمة $\rho_o c$ عند $\frac{1}{20}$ من التردد التى تصل عنده مقاومة الزور للبوق المخروطى هذه القيمة. بالمثل، في حال بوق القطع الزائد، تصل المقاومة النوعية للزور الوحدة عند ثلث تردد البوق الآسى.



الشكل 15.9 تتناسب الكمات A و B مع المقاومة الصوتية R_{AT} و المفاعلة الصوتية X_{AT} على الترتيب، للأبواق المخروطية والقطع الزائد المبينة في الأشكال 13.9 و14.9.

يبدو أنه من أجل أفضل شروط للتحميل على وحدة دافعة – للبوق على مدى التردد فوق تردد القطع فإنه يجب أن يستعمل المرء بوق قطع زائدى. لكن، يجب أيضا تذكر أن التشوه غير الخطى سيصبح أعلى في حالة بوق القطع الزائدى لأن الموجة تسافر مسافة أطول في البوق قبل أن يهبط الضغط نتيجة الزيادة في المساحة منها في حالة الأبواق الأخرى. من أجل أقل تشوه عند قدرة معينة لكل وحدة مساحة، فمن الواضح أن البوق المخروطى يكون الأفضل بين الأنواع الثلاثة. يكون البوق الآسى مقبول في العادة لأنه عند مقارنة التصميم نجد أنه يقع بين هاتين النهايتين.

10.9 الانحناءات في الأبواق

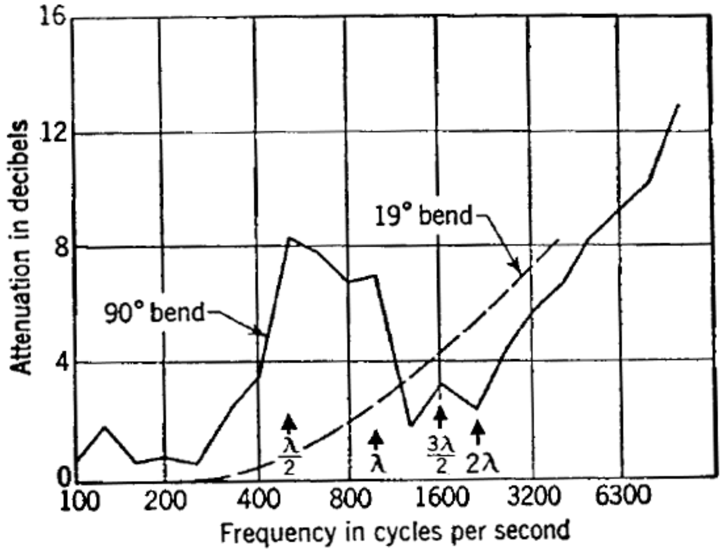
تكون سماعة البوق التى تستخدم عند الترددات المنخفضة كبيرة جدا وطويلة لأن m يجب أن تكون صغيرة لتردد القطع السفلى ومساحة الفم يجب أن تكون كبيرة لكى تشع الصوت بشكل صحيح. وكنتيجة، أصبح من المألوف "طوي" البوق حتى يكون ملائم بشكل مريح للنقالة.

تم ابتكار العديد من أنواع الأبواق المطوية التى تكون ناجحة تقريبا في إعادة إنتاج الموسيقى والخطاب باستجابة ترددية مقبولة. لكي تكون ناجحة، فإن الانحناءات في الأبواق المطوية يجب ألا تكون حادة عندما تقترب أبعادها الجانبية من نصف الطول الموجى، أو أنها سوف تغير طيف الصوت المشع.

لا تتوفر بيانات جيدة للأداء المقارن للأبواق المطوية. يكون هذا جزئيا بسبب صعوبة قياس استجابة الأبواق المطوية في غرفة عديمة الصدى وجزئيا بسبب أن الشركات التجارية تحمى البيانات. مع ذلك، فإن بعض البيانات تكون متوفرة على تأثير انحناءات الأنواع المختلفة في القنوات المستطيلة مثل المستعملة في أنظمة التهوية. تم عرض هذه البيانات في الشكل 16.9.

يرى أنه عندما يكون عرض القناة قريب من نصف أو ثلاثة أنصاف الطول الموجى فإن اضمحلال الصوت بواسطة الانحناء القائم (90^o) يكون كبير نسبيا. عند الترددات العالية، يكون الفقد كبير حتى مع انحناءات الـ 19^o. إذا كان ممكنا، يجب أن يكون الطول الموجى كبير مقارنة

مع عرض الأنبوب عند الانحناء، ومن ثم يكون الاضمحلال صغير جدا.



الشكل 16.9 اضمحلال الصوت نتيجة إدخال انحناءات 19^o و 90^o كدالة في التردد. لرؤية مخطط الأنبوب أنظر الشكل 20.11.

11.9 أشكال المقاطع – العرضية

في وقت سابق، ذكر أن شكل المقطع العرضى غير مهم جدا. هذا حقيقى بشرط أن الأبعاد الجانبية للبوق تكون غير مقارنة (لا تساوى) بالطول الموجى. عندما تكون الأبعاد الجانبية كبير بشكل كافي ، فإن الموجات الموقوفة توجد عبر الأنبوب، مثل الموجات الموقوفة في الأنبوبة المغلقة النهاية. تكون هذه الموجات غير مهمة في العادة في البوق ى الآسى الذي له مقطع دائرى أو مربع لأنه، بشكل عام، لأن مقاطع البوق القريبة من الفم هي فقط التى تكون أكبر من نصف الطول الموجى.

في البوق المستطيل المبنى من جانبين متوازيين والجانبان الأخران يتغيران طبقا للقانون الآسى أو قانون القطع الزائد، فإن الموجات الموقوفة من الممكن أن تتواجد بين الجانبين المتوازيين. تحدث حالات الرنين عند الأطوال الموجية التى تكون مضاعفات ثانوية لعرض الأنبوب، بمعنى، عند ترددات تساوى،

$$f = \frac{nc}{2l_x}$$ سلطان9-37

أو أن الأطوال الموجية تساوى،

$$\lambda = \frac{2l_x}{n}$$ سلطان9-38

حيث n عدد صحيح يساوى 1، 2، 3، 4، ....

على سبيل المثال، بفرض أن عرض البوق يساوى 1.5 قدم. حينئذ سوف يحدث الرنين (الموجات الموقوفة) عند 377، 754، 1508، إلخ...هيرتز. عند هذه الترددات، يحدث بشكل عام خرج قدرة مختزل. بشكل عام، يجب اختيار حد التردد العلوي للبوق منخفض بشكل كافي حتى يتم تجنب المشاكل الناتجة عن الموجات الموقوفة المستعرضة.

12.9 المواد

إن المواد التى يصنع منها البوق تكون مهمة جدا. إذا سببت جدران البوق رنين بشكل ميكانيكى عند تردد أو أكثر في مدى التشغيل، فإنه تحدث " منخفضات " في منحنى خرج – القدرة. يكون المعدن الرقيق غير المثبط (غير المخمد) هو أقل مادة مرغوبة لأن البوق الذي يصنع منها سيرن بقسوة عند الترددات المنخفضة بحق. تكون المعادن الثقيلة، التى تغطى الخارج مع مادة لاصقة مطاطية سميكة بحيث تمنع الرنين الميكانيكى، أفضل بكثير. يكون البوق الإسمنتي أو الجبسي بسمك من 1 إلى 2 بوصة أفضل بسبب وزنه وتثبيطه الداخلي.

يستخدم الخشب الحبيبى بشكل شائع في بناء الأبواق الكبيرة. بالرغم من أنه غير مقبول مثل البوق الإسمنتي، إلا أنه يعطى نتائج مرضية إذا ذاد سمكه عن ثلاثة أرباع البوصة وإذا تم تثبيته بقطع خشبية ملصوقة على فترات غير منتظمة بشكل متكرر.

المثال 3.9

مطلوب مجموعة بوقية تتكون من بوقين، أحدهما لإشعاع ترددات منخفضة والأخر إشعاع الترددات العالية. مطلوب أن تكون استجابة التردد مستوية بين 70 و6000 هيرتز وأن المجموعة

البوقية تصمم لتلائم حجرة جلوس من الحجم المتوسط. سوف يستخدم النظام لإعادة أنتاج موسيقى عالية الجودة في المنزل. يتم تقدير أقصى قدرات صوتية الواجب إشعاعها في ستة مناطق تردد كما يلي:

مدى التردد Frequency range	مستوى القدرة Power level, db re 10^{-13} watt
70–250	102
250–400	102
400–1000	102
1000–2200	99
2200–3000	96
3000–8000	96

الحل لبوق التردد – المنخفض

سوف نختار بوق آسى كأفضل حل وسط لشكل البوق لاستعمالنا. بسبب أن أدنى تردد مطلوب يشع عنده البوق هو 70 هيرتز، فإننا نختار مساحة الفم (الفوهة) من المعادلة 9ـ16،

$$\text{Mouth area } S_M = \frac{\lambda^2}{4\pi} = \frac{c^2}{4\pi f^2} = 1.93\ \text{m}^2 = 20.8\ \text{ft}^2$$

إن عشرون قدم ربما تكون كبيرة جدا لمساحة فم لغرفة جلوس في معظم البيوت، لذلك يكون التنازل ضروري.

دعنا نختار مساحة اختيارية للفم تساوى 10 قدم مربع (0.93 م^2). هذا يقابل لفتحة الجرس المبينة في الشكل 9ـ10ج. نرى من المخطط البيانى أنه أسفل $f = 2 f_c$ سوف توجد حالتين رنين، وهو ما ليس مرغوبا، لكنهما يضمحلان بحق بشكل جيد.

دعنا نصمم تردد القطع،

$$f_c = 60\ \text{Hz}$$

ثابت الاتساع m يساوى (انظر المعادلة 9ـ28)،

$$m = \frac{4\pi f_c}{c} = \frac{4\pi\, 60}{344.8} = 2.18\ \text{m}^{-1}$$

دعنا نختار وحدة مشعاع مباشر 12ـبوصة مع قطر فعال 0.25 كتر كدافع. تكون المساحة

الفعالة لوحدة الدافع تكون،

$$S_D = \pi(0.125)^2 = 0.049\ \text{m}^2$$

افترض الثوابت الأخرى لتكون على النحو التالي:

$$R_g = R_E = 6\ \text{ohms}$$
$$Bl = 15\ \text{Webers/m}$$

من المثال 9ـ2، يتضح أن أقصى كفاءة S_D / S_T يجب أن يساوي 2. لكن للبقاء على الطول صغيرا، دعنا نجعل،

$$\frac{S_D}{S_T} = 1$$

حينئذ،

$$r_{MT} = \frac{S_T}{\rho_o c S_D{}^2} = \frac{1}{(406)(0.049)} = 0.05\ \text{mks mechanical mohms}$$

دعنا نحسب PAE المرجعية. بفرض في الشكل 9ـ4ب أن $r_{MT} >> r_{MB}$. من المعادلة 9ـ7،

$$\text{PAE} = \frac{(400)(6)(0.05)(15)^2}{\left[(15^2)(0.05) + (12)(2)\right]^2} = 22\%$$

كمحاولة، دعنا نجعل $S_D / S_T = 2.0$. حينئذ $r_{MT} = 0.025$، و$\text{PAE} = 24\%$. أخير ضع $S_D / S_T = 2.0$. حينئذ يكون $r_{MT} = 0.1$، و $\text{PAE} = 15.8\%$.

من الواضح أن نسبة مساحة الزور ومساحة الحجاب متساوية مع فقد صغير في الكفاءة، بالتالي هذا يجعل طول البوق في الحالة الحالية قصير بشكل ملحوظ. يتم إيجاد طول البوق من المعادلة 9ـ17،

$$e^{mx} = \frac{0.93}{0.049} = 19$$

أو

$$mx = 2.94 \qquad \& \quad x = \frac{2.94}{2.18} = 1.35\,\text{m} = 4.4\ \text{ft}$$

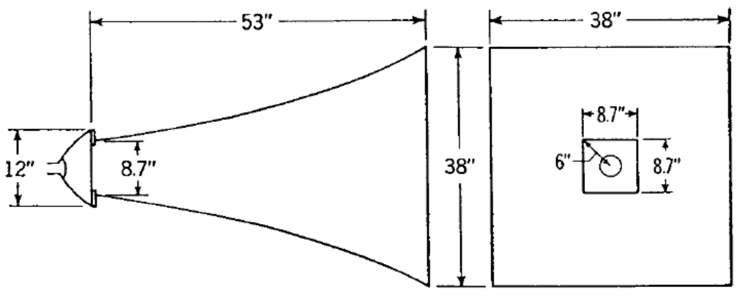
تكون شدات البوق مع مساحة الزور 0.049 م^2 كما يلى، بفرض توزيع منتظم للضغط، كما هو مدون في الجدول 1ـ9.

دعنا نضع الحد العلوي للتشغيل عند 600 هيرتز. حينئذ يكون $f / f_c = 10$. بمد خط 10 بوصة في الشكل 12ـ9 حتى 3.22×10^{-6} يبين أن النسبة المئوية لتشوه التوافق – الثانى في البوق سوف يكون 0.02٪ تقريبا، وهذا ما يمكن إهماله. في الحقيقة، يمكن زيادة مستوى القدرة 30 ديسيبل قبل أن يصبح التشوه كبير ويصل 1٪.

الجدول 1ـ9

Frequency	Power, watts	Watts/cm² at throat
70–250	1.58×10^{-3}	3.22×10^{-6}
250–400	1.58×10^{-3}	3.22×10^{-6}
400–1000	1.58×10^{-3}	3.22×10^{-6}
1000–2200	7.94×10^{-4}	1.62×10^{-6}
2200–3000	4×10^{-4}	8.16×10^{-7}
3000–8000	4×10^{-4}	8.16×10^{-7}

يبدو أن هذا الحساب يبين أن وحدة التردد ـ المنخفض يمكن أن تشغل بنجاح فوق 600 هيرتز. لكن، يبدو من الخبرة أنه لأسباب نفسية فإن التغير الكلى من بوق التردد ـ المنخفض إلى بوق تردد – عالى يجب أن يحدث عند تردد تحت 600 هيرتز من أجل أفضل النتائج السمعية.



الشكل 17ـ9 خطط لبوق آسى مستقيم بسيط له تردد قطع 60 هيرتز. مساحة زور 0.049 م^2، ومساحة فم تساوي 0.93 م^2.

دعنا نرى ما قيمة المطاوعة الكلية الواجبة لدائرة وحدة الدافع لموازنة مفاعلة الكتلة للبوق عند ترددات أسفل تردد رنين الحجاب الحاجز. من المعادلات 9ـ12، 9ـ13، و9ـ23 نحصل على،

$$C_{M2} = \frac{S_T^{\ 2}}{S_D^{\ 2}} C_{MT} = \frac{2S_T}{S_D^{\ 2}\rho_o c^2 m} = \frac{2S_T}{S_D^{\ 2}\gamma P_o m}$$

$$C_{M2} = \frac{2}{(1.4)(0.049)\times 10^5 (2.18)} = 1.34\times 10^{-4} \ \ \text{m/newton}$$

تشتمل الكمية C_{M2} المطاوعة المجمعة للسماعة والوعاء خلفها. بالرجوع إلى الشكل 8ـ5د يتبين أن هذه قيمة معقول للمطاوعة للتوقع من السماعة بهذا القطر. في حالة أن المطاوعة غير صحيحة، يمكننا تغيير حجم الزور، أو حتى m بعض الشيء، لتحقيق القيمة المرغوبة لـ C_{M2}.

البوقين المناسبين لتصميمنا هما البوق المربع المستقيم المبين في الشكل 9ـ17 أو البوق المطوى من نوع–Klipsch[6] المبين في الشكل 9ـ18. عند استخدام البوق المستقيم، ربما يكون من المحتمل ضروري وضعه بشكل جزئيا فوق السقف أو بشكل جزئيا تحت الأرضية لكي تجعل وجودها غير مكروها في الغرفة.

<u>الحل لبوق التردد – العالي</u>

كتردد للقطع دعنا نختار،

$$f_c = 300\text{Hz}$$

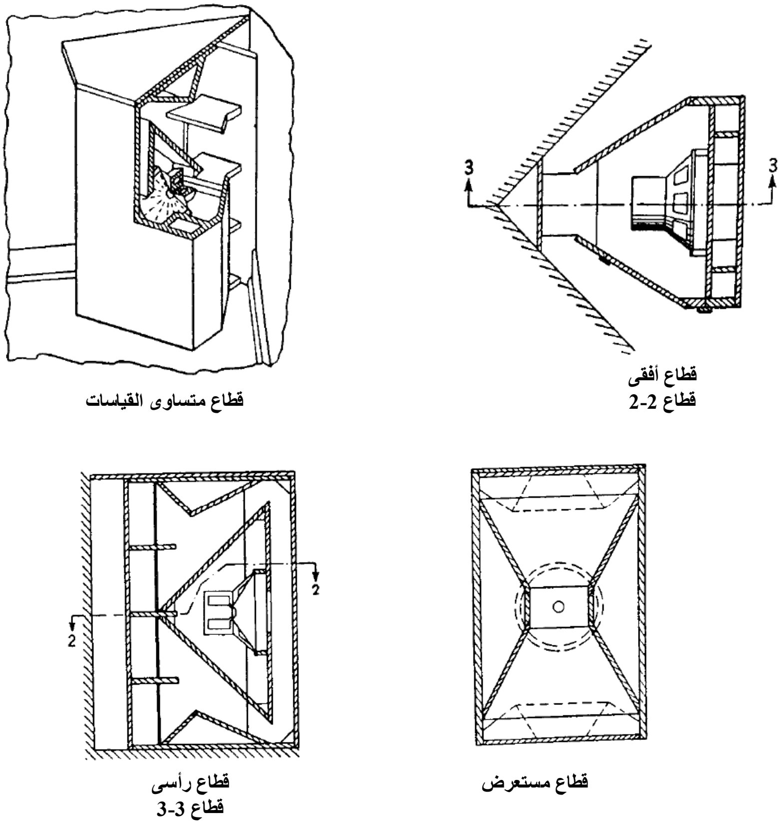
سوف نستخدم شبكة نقل كهربية ذات 500 هيرتز، والتى سوف تجعل الاستخدام فعال لكل من البوقين وتكون اختيار جيد للتردد من وجه نظر نفسية المستمع.

ثابت الاتساع (أنظر المعادلة 9ـ28) يكون على الصورة،

$$m = \frac{4\pi f_c}{c} = \frac{4\pi 300}{344.8} = 10.9 \ \text{m}^{-1}$$

دعنا نفترض أن وحدة الدافع تكون نفس الوحدة التى تمت مناقشتها في المثال 9ـ1. في

هذه الحالة، $S_T = 3.14 \times 10^{-4}\,\text{m}^2$.



الشكل 18.9 مخططات للبوق الآسى المطوى من نوع – Klipsch. هذا البوق الخاص يكون حوالى 40 بوصة ارتفاع وله استجابة ناعمة تحت 200 هيرتز.

يجب أن يشع البوق بشكل جيد تحت 400 هيرتز، بالتالي يجب أن تكون مساحة فتحة –الفم، إذا كان ممكنا، أكبر من المساحة المعطاة بالمعادلة 16.9،

$$S_M = \frac{c^2}{4\pi f^2} = \frac{(344.8)^2}{4\pi(400)^2} = 0.0591\ \text{m}^2 = 91.5\ \text{in.}^2$$

كما تعلمنا في الباب 4، لكى نحصل على نموذج توجيهية عريض، مثلا $\pm 30^o$ على مدى واسع من الترددات، فإن البوق يجب أن يكون له فم منحنى. دعنا نختار التصميم الذي يكون 6 بوصة ارتفاع وله فم منحنى دائرى له طول قوس 30 بوصة. مساحة الفم لهذه الأبعاد يكون 180 بوصة مربعة (أو 0.1163 متر مربع)، وهي ضعف المساحة المسماة من قبل.

يوجد طول البوق من المعادلة 17.9 كما يلي،

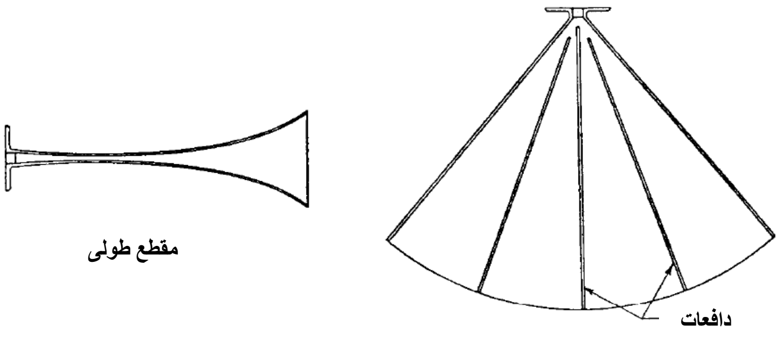
$$e^{mx} = \frac{(11.63)\times10^{-2}}{(3.14)\times10^{-4}} = 370$$

$$mx = 5.91$$

$$x = \frac{5.91}{10.9} = 0.541\,\text{m} = 21.3\,\text{in.}$$

البوق سوف يكون له الشكل ومساحة المقطع المبين في الشكل 19.9. تردد القطع يكون عند 300 هيرتز ويكون أسفل من500 هيرتز تردد العبور بشكل بعيد لكى تصبح معاوقة الزور مقاومية على مدى كامل المنطقة المفيدة للسماعة، بالتالى، لا حاجة حقيقية إلى موازنة $(\omega C_{M2})^{-1}$ مقابل مفاعلة كتلة البوق. على الرغم من ذلك، دعنا نحسب قيمة C_{M2} من المعادلات 12.9، 13.9، و23.9.

$$C_{M2} = \frac{2S_T}{{S_D}^2 \gamma P_o m} = \frac{(2)(39)}{(1.4)\times10^5(10.9)} = 5.1\times10^{-5}\ \text{m/newton}$$



الشكل 19.9 مستوى بوق آسى مستقيم بسيط له تردد قطع 300 هيرتز ومساحة زور $3.14\times10^{-4}\ \text{m}^2$ ، ومساحة فم $11.6\times10^{-2}\ \text{m}^2$. المقسمات ترشد الموجة على امتداد البوق وتميل إلى توليد صدر موجة مستوية ذات شدة منظمة عند الفم.

لا يكون مقدار هذه المطاوعة أيضا قيمة غير معقولة التحقق في وحدة الدفع من النوع المعطى في المثال 1.9.

أخيرا، دعنا نعين سعة القدرة المتناولة في هذا البوق. الشدة عند زور البوق I_T في الشريط من 3000 إلى 8000 هيرتز سوف تساوي،

$$I_T = \frac{4\times10^{-4}}{3.14} = 1.27\times10^{-4}\ \text{watt/cm}^2$$

عند التردد الأعلى لتصميمنا 6000 هيرتز نحصل على

$$\frac{f}{f_c} = \frac{6000}{300} = 20$$

نرى من الشكل 12-9 أن تشوه التوافق – الثاني سوف يساوى 0.4٪. هذا يكون تشوه منخفض، ونستنتج أن هذا التصميم مقبول.

سلطان

مراجع هذا الباب

1- H.F. Olson "Elements of Acoustical Engineering," 2nd ed., Chap. VII, Van Nostrand Company, Inc. New York, 1947. سلطان لمناقشة سماعات البوق

2- أنظر أيضا الشكل 2ـ7 صفحة 188 للمرجع 1. لاحظ أن كفاءة أولسون هي النسبة $100 r_{MT} B^2 l^2 /(R_E + r_{MT} B^2 l^2)$، بفرض أن $r_{MT} >> r_{MB}$.

3- A.L. Thuras, R.T. Jenkins, and H.T. O'Neil, Extraneous Frequencies Generated in Air Carrying Intense Sound Waves, J. Acoust. Amer. 6: 173-180 (1935).

4- L. H. Black, A Physical Analysis of the Distortion Produced by the Non-linearity of the Medium, J. Acoust. Amer. 12: 266-267 (1940).

5- H.F. Hopkins and N.R. Stryker, a proposed Loudness-efficiency Rating for Loudspeaker and Dtermination of System Power Requirements for Enclosures, Proc. IRE, 36: 315-335 (1948).

6- P.W. Klipsch, A Low-Frequency Horn of Small Dimensions, J. Acoust. Amer. 13: 137-144 (1941).

الباب العاشر

الأصوات في الأوعية

THE SOUNDS IN ENCLOSURES

الجزء الثالث والعشرون – مجالات الصوت في الأوعية الصغيرة المنتظمة الشكل

1.10 مقدمة

لا تتضمن دراسة الصوت في الأوعية البحث عن كيفية انعكاس الصوت إلى الخلف وإلى الأمام في الوعاء فقط بل أيضا البحث عن كيفية قياس الصوت تحت تلك الظروف وتأثير المواد المختلفة في امتصاص والتحكم في هذا الصوت. أيضا، لدراسة الصوت في الأوعية أهمية كبيرة في تطبيق المعرفة الهندسيه لسلوك الصوت في مثل هذه الفراغات المغلقة في فهم التفضيلات الشخصية للمستمعين، سواء كان إنصات في الغرفة التى تنتج فيها الموسيقى أو في نقطة استماع بعيدة عن الميكروفون اللاقط. تحتل المعايير النفسية للتصميم الصوتى انتباه العديد من المحققين ويجب ألا تغفل أبدا. يقتصر هذا الباب على الصوتيات الفيزيائية. سوف تناقش العوامل النفسية في الباب 13، الذي يتعلق بالظاهرة الصوتنفسية، ومعايير التصميم الصوتى.

توجد طريقتين لدراسة الصوت في الأوعية يمكن تحليلها وتفهمها بسهولة. في الطريقة الأولى يكون لدينا أوعية صغيرة لها شكل بسيط، مثل الصناديق المستطيلة، الأنابيب الأسطوانية، أو الهياكل الكروية. في هذه الحالات، يكون مجال الصوت الداخلى قابل للوصف بواسطة مصطلحات رياضية دقيقة، بالرغم من أن التحليل يصبح معقدا عندما تغطى جدران الأوعية كليا أو جزئيا بمواد ممتصة للصوت.

في الطريقة الأخرى، يكون لدينا أوعية غير منتظمة الشكل حيث لا يمكن عمل وصف دقيق لمجال الصوت في الغرفة. يماثل هذا الإجراء الدراسة التي يطلب من طبيب تقرير عدد سنوات هو سيعيشها رجل معين، مقابل دراسة كاملة للسكان على قاعدة إحصائية لتحديد كم

سيعيش كل رجل، في المتوسط. كما قد يتوقع، تؤدي الدراسة الإحصائية إلى صيغ أسهل منها في دراسة مفصلة لحالة معينة.

2.10 الموجات الثابتة والموقوفة.

تم دراسة نوع واحد من الأوعية الصغيرة المنتظمة الشكل، الانبوبة المغلقة بإحكام (بشكل متصلب)، في الجزء الرابع. هذه الحالة تعطى مثال ممتاز للحالة الصوتية الموجودة في الأوعية الكبيرة.

أولا، نلاحظ أنه على طول محور x للأنبوبة يمكن وصف محال الصوت كمجموعة من موجة تنتقل نحو الخارج وموجة تنتقل نحو الداخل. في الحقيقة، الموجة المنتقلة للخارج تكون عبارة عن موجة المجال – الحر الأصلية الخارجة التي بدأت من المصدر زائد الموجات الخارجة التى تصنع رحلتها الثانية، الثالثة، الرابعة، وهكذا، ذهاب وإياب. بالمثل، فإن الموجة المنتقلة للداخل تكون عبارة عن مجموع الموجة المنعكسة الأولى والموجات التى تصنع رحلتها الثانية، الثالثة، الرابعة، وهكذا، ذهاب وإياب. تضاف هذه الموجات المنتقلة للخارج وللداخل في المقدار لتولد ما يسمى بالموجة الثابتة [1] إذا كانت الشدة على طول الانبوبة تساوى الصفر أو ما يسمى بالمودة الموقوفة إذا وجد امتصاص عند النهاية الطرفية للموجة بحيث تتدفق القدرة من المصدر إلى الاتجاه البعيد (الشدة لا تساوى الصفر).

3.10 الأنماط الطبيعية والترددات الطبيعية

رأينا من المعادلة 2ـ48 أنه حينما يكون التردد الدافع بحيث $\sin kl \to 0$ ، فإن الضغط في الانبوبة يصل إلى قيمة كبيرة جدا. بمعنى أخر، يكون الضغط كبير جدا عندما،

$$kl = n\pi \qquad \text{سلطان} \ 10\text{-}1$$

حينئذ، بما أن $k = 2\pi f / c = 2\pi / \lambda$ نحصل على

$$f_n = \frac{nc}{2l} \qquad 10\text{-}2$$

أو

$$\frac{l}{\lambda} = \frac{n}{2}$$ سلطان10-3

حيث

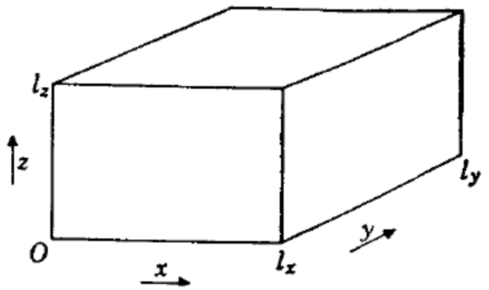
$$n = 1, 2, 3, 4, ..., \infty$$ سلطان10-4

f_n تردد الرنين رقم n للأنبوبة، و $\lambda_n = c / f_n$ الطول الموجى للرنين رقم n للأنبوبة. تخبرنا المعادلة 10ـ3 أن الضغط يـكون كبير جدا عندما يساوى طول الانبوبة مضاعف صحيح لنصف الطول الموجى ($\lambda / 2$).

يسمى الشرط حيث يساوي التردد المقدار $nc/2l$ بحيث ينشأ ضغط صوت كبير جدا شرط الرنين أو النمط الطبيعي لاهتزاز فضاء الهواء في الأنبوبة. يسمى التردد f_n للنمط الطبيعى للاهتزاز بالتردد الطبيعى. يوجد للأنبوبة عدد لانهائى من الأنماط الطبيعية للاهتزاز لأن n يمكن أن تأخذ كل قيم الأعداد من صفر إلى ما لانهاية. قد ننظر إلى الأنبوبة، أو في الحقيقة إلى أي وعاء، كتجمع كبير من المرنانات الصوتية، لكل منها تردده الطبيعي الخاص به.

في مناقشة الانبوبة المغلقة في الجزء الرابع، لم نتطرق إلى ذكر تأثير شكل مساحة المقطع أو حجم الانبوبة على النتائج. تم افتراض أن الأبعاد المستعرضة كانت أقل من عُشر الطول الموجى لكى لا يحدث رنين مستعرض عند منطقة التردد ذات الاهتمام. إذا كانت الأبعاد المستعرضة أكبر من نصف طول الموجة، وكان لدينا غرفة صغيرة وبفرض أنها مستطيلة، فإنها يمكن أن توصف بالأبعاد المبينة بالشكل 10ـ1. يمكن أن تسافر الموجات في الغرفة ذهابا وجيئة بين أى جدارين متقابلين. يمكن أن تسافر الموجات أيضا حول الغرفة بما فيها الجدران بزوايا سقوط مختلفة. إذا تم اختيار هذه الزوايا بالشكل الصحيح، فإن الموجات ستعود على نفسها مكونة موجات ثابتة أو موقفة. تكون كل موجة موقوفة نمط طبيعى لاهتزاز الوعاء.

من الشيق في مثل هذا الوعاء المستطيل أن نحل رياضيا ونصف بالضبط توزيع الصوت كما هو محدد بشدة ونوع المصدر. إن هذه الدراسة تعتبر خارج نطاق هذا النص. ومع ذلك، سوف نصف الحالات الأبسط ونقترح مصادر للقراءة الإضافية لمن يهتم.[2,3]



الشكل 1.10 أبعاد ونظام المحاور لوعاء مستطيل.

يكون عدد أنماط الاهتزاز في وعاء مغلق أكبر بكثير منه في الانبوبة المغلقة بشكل صلب التى لها قطر يقارن الطول الموجى. في الحقيقة، تعطى الترددات الطبيعية لمثل هذا الوعاء بالمعادلة،

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \qquad \text{10-5سلطان}$$

حيث f_n التردد الطبيعى رقم n بالهيرتز، n_x، n_y، و n_z أعداد يمكن اختيار ها بشكل منفصل. من الممكن أن تأخذ كل الأعداد القيم بين صفر وما لانهاية. l_x، l_y، و l_z أبعاد الغرفة بالمتر، و c سرعة الصوت بالمتر لكل ثانية.

على سبيل المثال، دعنا نفترض أن البعد z هو l_z يكون أقل من 0.1 من كل الأطوال الموجية المأخوذة في الأعتبار. هذا يقابل أن n_z تكون صفر عند كل الأوقات. بالتالى،

$$f_{n_x,n_y,0} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2} \qquad 10\text{-}6$$

دع $l_x = 12$ ft و $l_y = 10$ ft. أوجد الترددات الطبيعية في حالة أنماط الاهتزاز الطبيعى $n_x = 1$، $n_y = 1$، و $n_x = 3$، $n_y = 2$. يكون لدينا

$$f_{1,1,0} = \frac{1131}{2}\sqrt{\frac{1}{144} + \frac{1}{100}} = 73.5 \text{ Hz}$$

و

$$f_{3,2,0} = \frac{1131}{2}\sqrt{\frac{9}{144} + \frac{4}{100}} = 181 \text{ Hz}$$

بين العالم مورس[2] أن توزيع ضغط – الصوت في صندوق مستطيل لكل نمط طبيعي للاهتزاز مع تردد طبيعي ω_n يتناسب مع حاصل ضرب ثلاثة جيوب تمام على النحو،

$$p_{n_x,n_y,n_z} \ \alpha \ \cos\frac{\pi n_x x}{l_x} \cos\frac{\pi n_y y}{l_y} \cos\frac{\pi n_z z}{l_z} \ e^{j\omega_n t} \qquad 10\text{-}7$$

حيث يكون أصل الإحداثيات عند زاوية المستطيل. عند كتابة المعادلة 10ـ7 تم إفتراض أن للجدران امتصاص منخفض جدا. إذا كان الامتصاص عالى، فإن ضغط الصوت لا يمكن تمثيله بحاصل ضرب بسيط لجيوب التمام.

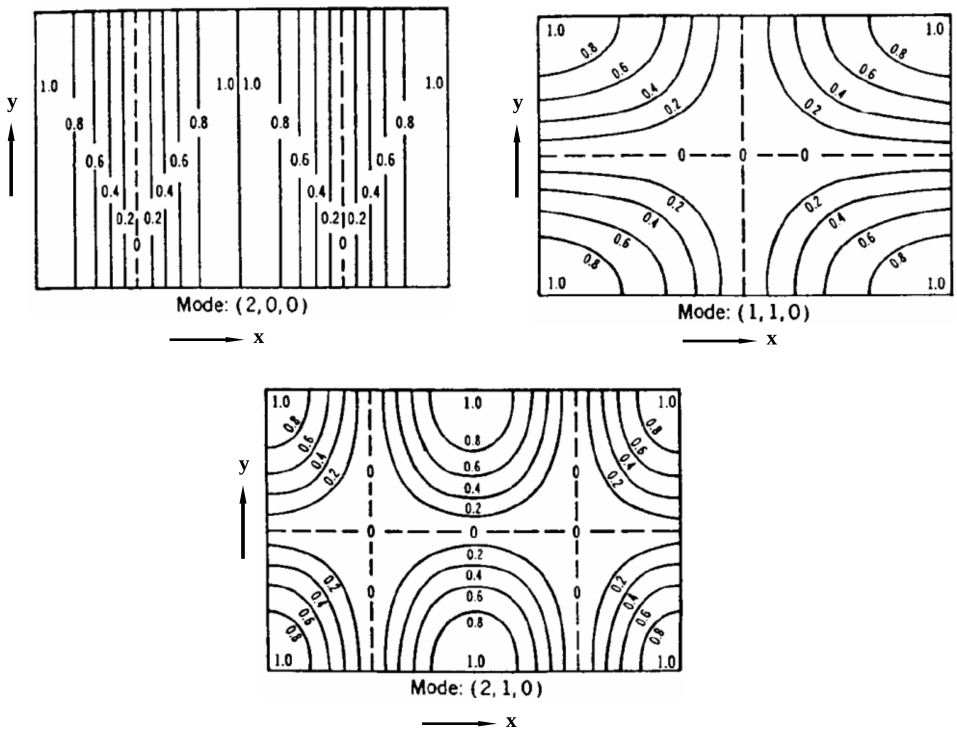
إذا فحصنا المعادلة 10ـ7 بالتفصيل نجد أن n_x، n_y، و n_z تبين عدد مستويات الضغط الصفرى الذي يحدث على امتداد الإحداثيات x، y، و z، على الترتيب. يمكن تمثيل مثل هذا التوزيع لمستويات ضغط الصوت بموجات تسافر نحو الخارج وأخرى تسافر نحو الداخل في الغرفة. تناظر هذه الحالة لحالة الانبوبة المغلقة (حالة أحادية البعد). يبين الشكل 10ـ2 أمثلة لتوزيع الضغط لثلاثة أنماط اهتزاز في غرفة مستطيلة. تبين الخطوط مستويات ضغط ثابت تمتد من الأرضية إلى السقف على امتداد البعد z. لاحظ أن n_x و n_y تبين عدد مستويات الضغط الفرى على امتداد المحاور x و y على الترتيب.

الزوايا θ_x، θ_y، و θ_z هى زوايا سقوط وانعكاس الموجات المنتقلة للأمام وللخلف على الجدران. تعطى هذه الزوايا بالعلاقات،

$$\theta_x = \tan^{-1}\frac{\sqrt{(n_y/l_y)^2+(n_z/l_z)^2}}{n_x/l_x} = \cos^{-1}\frac{n_x c}{2l_x f_n} \qquad 10\text{-}8$$

$$\theta_y = \tan^{-1}\frac{\sqrt{(n_x/l_x)^2+(n_z/l_z)^2}}{n_y/l_y} = \cos^{-1}\frac{n_y c}{2l_y f_n} \qquad 10\text{-}9$$

$$\theta_z = \tan^{-1}\frac{\sqrt{(n_x/l_x)^2+(n_y/l_y)^2}}{n_z/l_z} = \cos^{-1}\frac{n_z c}{2l_z f_n} \qquad 10\text{-}10$$



الشكل 2.10 رسوم كنتورية لضغط – الصوت في قطاع خلال غرفة مستطيلة. تدل الأرقام المبينة على الرسومات على ضغط الصوت النسبي.

على سبيل الأمثلة حيث $n_x = 1$، $n_y = 1$ و $n_x = 3$، $n_y = 2$ تنعكس الموجات المسافرة من الجدران $x = 0$ و $x = l_x$ عند الزوايا،

$$(\theta_x)_{1,1,0} = \tan^{-1}\frac{l_x}{l_y} = \tan^{-1}\frac{12}{10} = 50.2^o$$

$$(\theta_x)_{2,3,0} = \tan^{-1}\frac{2l_x}{3l_y} = \tan^{-1}0.8 = 38.65^o$$

تكون زوايا الانعكاس عند من الجدران $y = 0$ و $y = l_y$ هي

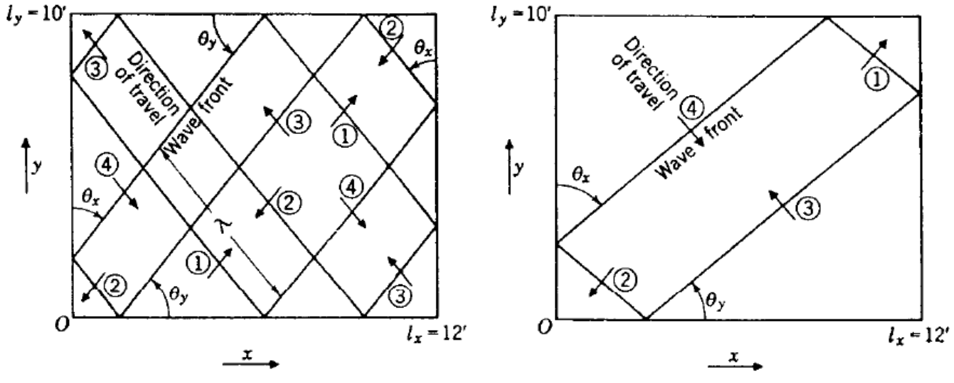
$$(\theta_y)_{1,1,0} = \tan^{-1}\frac{l_x}{l_y} = 39.8^o$$

$$(\theta_y)_{3,2,0} = \tan^{-1}\frac{3l_x}{2l_y} = \tan^{-1}\frac{30}{24} = 51.35^o$$

تم بيان انتقال صدور الموجة في (أ) و(ب) من الشكل 10ـ3. يتضح من الشكل أنه توجد موجتان تسافر نحو الخارج (متقدمة) (1 و3) وموجتان تسافران نحو الداخل (متقهقرة)(2 و4). في حالة الأبعاد الثلاثة، سوف توجد أربعة موجات متقدمة وأربعة متقهقرة.

عند وضع مادة ممتصة للصوت على بعض أو كل أسطح الوعاء، فإن الطاقة سوف تمتص من مجال الصوت عند هذه الأسطح وسوف يتغير توزيع ضغط – الصوت عنه في حالة الجدار الصلب. على سبيل المثال، إذا تم وضع المادة الممتصة على أحد جدران $l_x\, l_z$ ، فإن ضغط الصوت سوف يكون أقل عند الجدار الأخر $l_x\, l_z$ وسوف تعانى الموجة المسافرة من إزاحة طور عند انعكاس ها من السطح الممتص.

لا يمكن أن تثار كل الأنماط الطبيعية من الاهتزاز إلى مداهم الأكمل بواسطة مصدر صوت موضوع عند غير نقطة أقصى ضغط في الغرفة. في الشكل 10ـ2، على سبيل المثال، يمكن أن يثير مصدر الصوت فقط نمط طبيعى إلى أكمل مداه إذا كان عند الكنتور 1.0. من الواضح أنه بما أن قيمة ذروة الصوت تحدث على الكنتور 1.0، فإن الميكروفون أيضا يجب أن يوضع على الكنتور 1.0 ليقيس أقصى ضغط.



(ب) (أ)

الشكل 10ـ3 صدور الموجة واتجاه السفر في حالة نمط الاهتزاز الطبيعي : (أ) $n_x = 1,\ n_y = 1$ **و(ب)** $n_x = 3,\ n_y = 2$ **. تمثل هذه الرسومات حالة ثنائية البعد حيث** $n_z = 0$ **. الأرقام 1 و3 تشير إلى الموجات المتقدمة، والأرقام 2 و4 تشير إلى الموجات المتقهقرة.**

إذا كان المصدر عند زاوية غرفة مستطيلة، فإنه يمكن أن يثير كل نمط اهتزاز إلى أكمل

مداه بشرط أن يشع الطاقة الصوتية عند كل تردد طبيعي. بالمثل، إذا كان الميكرفون عند زاوية الغرفة، فإنه سوف يقيس ذروة ضغط الصوت لكل نمط اهتزاز طبيعي بشرط أن يكون النمط مثار.

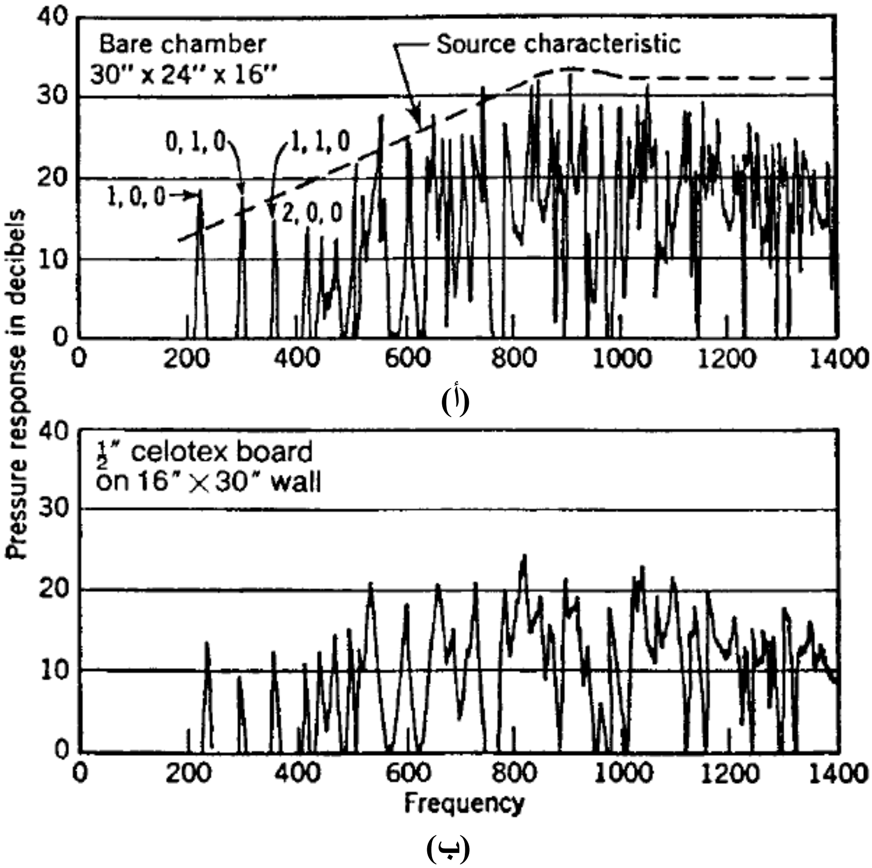
إذا كان المصدر أو الميكروفون عند مركز غرفة مستطيلة، فإن $\frac{1}{8}$ أنماط الاهتزاز الطبيعية فقط سوف تثار أو ترصد (تكشف)، لأنه عند مركز الغرفة يكون لـ $\frac{7}{8}$ من الأنماط كنتورات ضغط صفرى. في الشكل 10ـ2، على سبيل الإيضاح، يكون لإثنين من ثلاثة أنماط طبيعية مصورة (مرسومة) كنتورات ضغط صفرى عند مركز الغرفة. في الحقيقة، فقط هذه الأنماط الاهتزازية التى لها أعداد زوجية آنية n_x ، n_y ، و n_z سوف لا يكون لها ضغط صوت صفرى عند المركز.

تبين الأشكال 10ـ4 و10ـ5 أمثلة لإرسال الصوت من سماعة صغيرة إلى ميكروفون مصغر في غرفة نمط الصوت. تم الحصول على المنحنيات بالتغير البطيء لتردد (نغمة نقية) السماعة وتسجيل خرج الميكروفون بشكل آنى. الزيادة بثمانية مرات في عدد أنماط الاهتزاز التى تم إثارتها بالمصدر عند الزاوية علاوة على تلك الموجودة والمصدر في المركز تكون ظاهرة. من الظاهر أيضا أن إضافة المادة الممتصة – للصوت تقلل ارتفاع قمم الرنين وتنعم منحنى الإرسال، خاصة عند التردد العالية، حيث تكون المادة الممتصة أكثر فعالية.

10ـ4 ضغوط الصوت في الحالة – الثابتة والعابرة

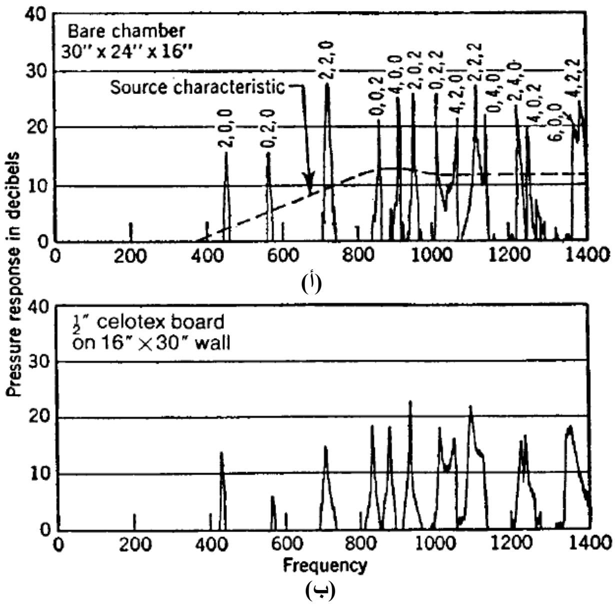
عندما فتح مصدر الصوت في وعاء صغير، مثل ذلك المبين في الشكل 10ـ1، فإنه سوف يثير موجة أو أكثر من الموجات – الثابتة الممكنة، بمعنى أنماط طبيعية للاهتزاز في الغرفة. دعنا نفترض أن المصدر ثابت الشدة وأن له تردد واحد وأن تردده يتطابق مع أحد الترددات الطبيعية للوعاء. سوف يعزز ضغط الصوت لتلك النمط الطبيعي للاهتزاز حتى يساوى مقدار جذر متوسط مربعات (متوسطة في الزمن وفي الفضاء أيضا عن طريق تحريك الميكروفون للأمام وإلى الخلف على مدى طول الموجة) القيمة[4] ،

$$|p_n| = \frac{K}{k_n} \qquad (10\text{-}11)$$



الشكل 4.10 مقارنة بين إثنين من منحنيات الإرسال مسجلة مع وجود وعدم وجود عينة مادة ممتصة على جدار 30×24 بوصة لغرفة نموذج أبعادها $30 \times 24 \times 16$ بوصة. الميكروفون كان عند إحدى الزوايا، والمصدر عند الزاوية المقابلة قطريا. تبين الخطوط المتقطعة الاستجابة النسبية لسماعة صغيرة (قطر 3\8 بوصة) مقاسة عند 2 بوصة في الفضاء الحر. الديسيبل الصفرى لمنحنى المصدر يكون تقريبا 50 ديسيبل مرجع 0.0002 ميكروبار وبالنسبة لمنحنى الإرسال يكون تقريبا 78 ديسيبل مرجع 0.0002 ميكروبار.[4]

حيث K ثابت المصدر يتعين بشكل أساسى بواسطة شدة ومكان المصدر وبواسطة حجم الغرفة، k_n ثابت تخميد (اضمحلال) يتعين بشكل أساسى بواسطة كمية الامتصاص في الغرفة وبحجم الغرفة. كلما زادت المادة الممتصة المدخلة إلى الغرفة كلما كان الثابت k_n كبيرا، وتناقصت قيمة الضغط المتوسط.



الشكل 5ـ10 مثل الشكل 4ـ10 ماعدا أن المصدر كان في مركز الغرفة ومرجع الديسيبل الصفرى لميزة المصدر يكون حوالى 71 ديسيبل مرجعى 0.0002 ميكروبار.

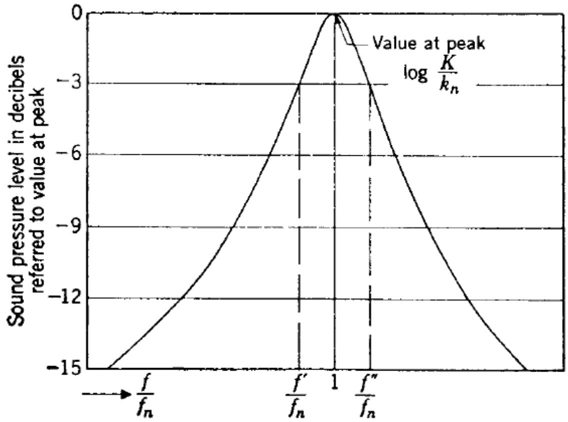
عندما لا يتطابق التردد الدافع مع التردد الطبيعي، فإن ضغط تلك نمط الاهتزاز الخاص يعزز طبقاً لمنحنى الرنين القياسى كما هو مبين بالشكل 6ـ10. عرض منحنى الرنين عند نقط نصف – القدرة (3 ديسيبل أسفل) يساوى [5]،

$$f''-f'=\frac{k_n}{\pi} \qquad 10\text{-}12$$

حيث ω هو التردد الزاوى الدافع الزاوى و ω_n التردد الزاوى الطبيعى الذي يعطى بشكل تقريبى بالمعادلة 5ـ10.

من الواضح أنه، عند ما يقع التردد الداع بين ترددين طبيعيين أو إذا كان k_n كبير بحيث يكون منحنى الرنين عريض، فإنه سوف يثار أكثر من نمط اهتزاز طبيعى واحد بشكل قوى، كل إلى المدى المبين بالمعادلة 13ـ10.

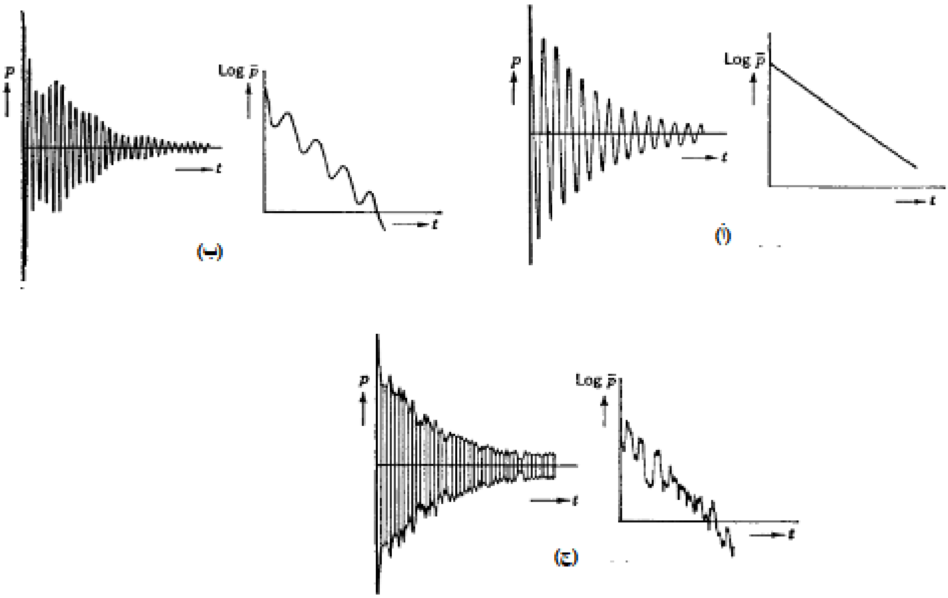
عند إطفاء مصدر الصوت، فإن كل نمط اهتزاز طبيعى يعمل مثل دائرة رنين – التوازى التى فيها يتم تخزن الطاقة أولاً. سوف يضمحل ضغط كل نمط اهتزاز طبيعى بشكل آسى عند تردده الطبيعى الخاص به كما هو مبين بالشكل 7ـ10.



الشكل 6.10 منحنى رنين لنمط اهتزاز طبيعي. مستوى ضغط الصوت مقابل نسبة التردد إلى f_n .

يعطى مقدار ضغط الصوت p_n بالعلاقة،

$$\left|p_n\right| = \frac{2K\omega}{\sqrt{4\omega_n{}^2 k_n{}^2 + (\omega^2 - \omega_n{}^2)^2}}$$ سلطان10-13



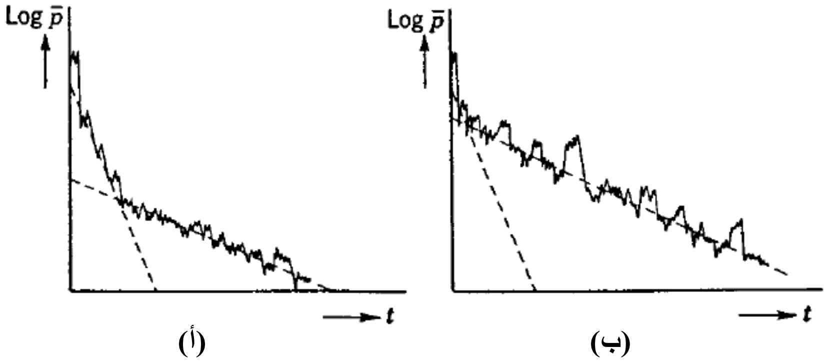
الشكل 7.10 (أ) منحنى اضمحلال ضغط – الصوت لنمط اهتزاز واحد. (ب) منحنيات اضمحلال ضغط – الصوت لنمطين اهتزاز متقاربين لهما نفس ثابت الاضمحلال. (ج) منحنيات اضمحلال ضغط – الصوت لعدد من انماط الاهتزاز المتقاربة لها نفس ثابت الاضمحلال. يبين المنحنى الموجود على اليسار سياق ضغط الصوت اللحظي، والمنحنى الموجود على اليمين يبين غلاف المنحنى على اليسار، مرسوم بين $\log p$ ونظام محور t.

إذا أثير نمط اهتزاز واحد، فإن الاضمحلال يكون كما هو مبين بالشكل 10-7أ ويعطى بالعلاقة،

$$p_n = \frac{K}{k_n} e^{-k_n t} \cos \omega_n t \qquad \text{10-14}$$

بشكل مختلف يمكن القول، على التدريج $\log p_n$ مقابل الزمن، فإن مقدار ج م م مستوى ضغط الصوت يضمحل خطيا مع الزمن.

عندما يضمحل نمطين أو أكثر من أنماط الاهتزاز في آن واحد، فإنه سوف تحدث ضربات لأن لكل نمط تردده الطبيعي الخاص به (الشكل 10-7ب وج). أيضا، من الممكن جدا أن يكون لكل منها ثابت اضمحلال ه الخاص به، وذلك يعتمد على مكان المادة الممتصة في الغرفة. في تلك الحالة، سوف تضمحل منحنيات مقدار مستوى ضغط – الصوت بميلين أو أكثر كما هو مبين في الشكل 10-8.



الشكل 10-8 منحنيات اضمحلال مع ميل مزدوج متولدة بواسطة أنماط اهتزاز طبيعية لها ثوابت اضمحلال مختلفة.

في الخلاصة، نرى أنه عندما يكون مصدر الصوت عند تردد معين موضوع في وعاء مستطيل، فإنه سوف يثير حالة أو أكثر من حالات الرنين، تسمى أنماط اهتزاز طبيعية. لكل من هذه الأنماط توزيع مختلف لضغوط الصوت في الوعاء، تردده الطبيعي الخاص به، ومعامل اضمحلال ه الخاص به. يعين ثابت الاضمحلال أقصى ارتفاع وعرض منحنى رنين ضغط – الصوت في الحالة الثابتة.

علاوة على ذلك، عند إطفاء مصدر الصوت، فإن ضغط الصوت المصاحب لكل نمط اهتزاز يضمحل بشكل آسى مع التردد الطبيعى الخاص به وبمعدل يتعين بثابت اضمحلال ه. بالتالى تكون الغرفة عبارة عن تجمع من المرنانات التى تعمل بشكل مستقل عن بعضها البعض عندما يطفأ مصدر الصوت. كلما كانت الغرفة أكبر وكلما كان التردد أعلى، فإن الترددات الطبيعية تكون أكثر تقاربا وعدد أنماط الاهتزاز المثارة بمصدر آحادى – التردد أو بمصدر ذات شريط رفيع يصبح أكبر.

5.10 أمثلة للأوعية المستطيلة

المثال 1.10

عين الترددات الطبيعية وجيوب التمام الإتجاهيه لأقل ستة أنماط اهتزاز طبيعية في غرفة لها الأبعاد $20\times14\times8$ ft.

الحل

من المعادلة 5.10 نرى أن،

$$
\begin{aligned}
f_{1,0,0} &= 113\tfrac{2}{2} \times \tfrac{1}{20} = 28.3 \text{ cps}\\
f_{0,1,0} &= 113\tfrac{2}{2} \times \tfrac{1}{14} = 40.4 \text{ cps}\\
f_{1,1,0} &= 113\tfrac{2}{2} \sqrt{\tfrac{1}{400} + \tfrac{1}{196}} = 49.3 \text{ cps}\\
f_{2,0,0} &= 113\tfrac{2}{2} \times \tfrac{2}{20} = 56.6 \text{ cps}\\
f_{2,1,0} &= 113\tfrac{2}{2} \sqrt{\tfrac{4}{400} + \tfrac{1}{196}} = 69.6 \text{ cps}\\
f_{0,0,1} &= 113\tfrac{2}{2} \times \tfrac{1}{8} = 70.7 \text{ cps}
\end{aligned}
$$

من المعادلات 8.10 حتى 10.10 نجد أن وجيوب التمام الاتجاهية كما يلى،

بالنسبة للنمط (1، 0، 0):

$$\theta_x = 0^o;\ \ \theta_y = 90^o;\ \ \theta_z = 90^o$$

بالنسبة للنمط (0، 1، 0):

$$\theta_x = 90^o;\ \ \theta_y = 0^o;\ \ \theta_z = 90^o$$

بالنسبة للنمط (1، 1، 0):

$$\theta_x = \cos^{-1}\frac{566}{20\times 49.3} = 55^o$$

$$\theta_y = \cos^{-1}\frac{566}{14\times 49.3} = 35^o$$

$$\theta_z = 90^o$$

بالنسبة للنمط (2، 0، 0):

$$\theta_x = 0^o;\ \theta_y = 90^o;\ \theta_z = 90^o$$

بالنسبة للنمط (2، 1، 0):

$$\theta_x = \cos^{-1}\frac{1132}{20\times 69.6} = 35.5^o$$

$$\theta_y = \cos^{-1}\frac{566}{14\times 69.6} = 54.5^o$$

$$\theta_z = 90^o$$

بالنسبة للنمط (1، 0، 0):

$$\theta_x = 90^o;\ \theta_y = 90^o;\ \theta_z = 0^o$$

المثال 2.10

عند استعمال مصدر تردده 50 هيرتز لإثارة الغرفة الموصوفة في المثال السابق، ماذا ستكون السعات النسبية للضغط لأقل ستة أنماط اهتزاز؟ افترض أنه عندما يساوي تردد المصدر أي من الترددات الطبيعية، فإن سعة القمة لذلك النمط الطبيعي للاهتزاز ستكون تماما مثلها لأي نمط اهتزاز طبيعي آخر. افترض أيضا أن k_n تساوي $2.0\sec^{-1}$.

الحل

من المعادلة 10.13 تجد أن:

$$|p_n|_{(1,0,0)} = \frac{2K \cdot 314}{\sqrt{(4)(178)^2(4) + (314^2 - 178^2)^2}} = 0.0094K$$

$$|p_n|_{(0,1,0)} = \frac{2K \cdot 314}{\sqrt{(4)(254)^2(4) + (314^2 - 254^2)^2}} = 0.01835K$$

$$|p_n|_{(1,1,0)} = \frac{2K \cdot 314}{\sqrt{(4)(310)^2(4) + (314^2 - 310^2)^2}} = 0.225K$$

$$|p_n|_{(2,0,0)} = \frac{2K \cdot 314}{\sqrt{(4)(356)^2(4) + (314^2 - 356^2)^2}} = 0.0224K$$

$$|p_n|_{(2,1,0)} = \frac{2K \cdot 314}{\sqrt{(4)(437)^2(4) + (314^2 - 437^2)^2}} = 0.00678K$$

$$|p_n|_{(0,0,1)} = \frac{2K \cdot 314}{\sqrt{(4)(444)^2(4) + (314^2 - 444^2)^2}} = 0.00637K$$

بفحص المعادلة 10ـ13 تبين أنه عندما $\omega_o = \omega$ و $k_n = 2$ ، فإنه يكون $|p_n| = 0.5K$. بالتالى، بالتعبير بوحدات الديسيبل فإن مقدار الستة أنماط الطبيعية للاهتزاز المعطاة من قبل، نسبة إلى $0.5K$ تكون

(1,0,0): −34.5 db
(0,1,0): −28.7 db
(1,1,0): − 6.9 db
(2,0,0): −27.0 db
(2,1,0): −37.4 db
(0,0,1): −37.9 db

من الواضح أنه في حالة k_n تكون صغيرة وتساوى 2 وفي حالة أدنى ترددات طبيعية فإن النمط الطبيعى للاهتزاز الموضوع أقرب إلى التردد الدافع هو فقط الذي يستقبل إثارة يمكن تقديرها.

المثال 10ـ3

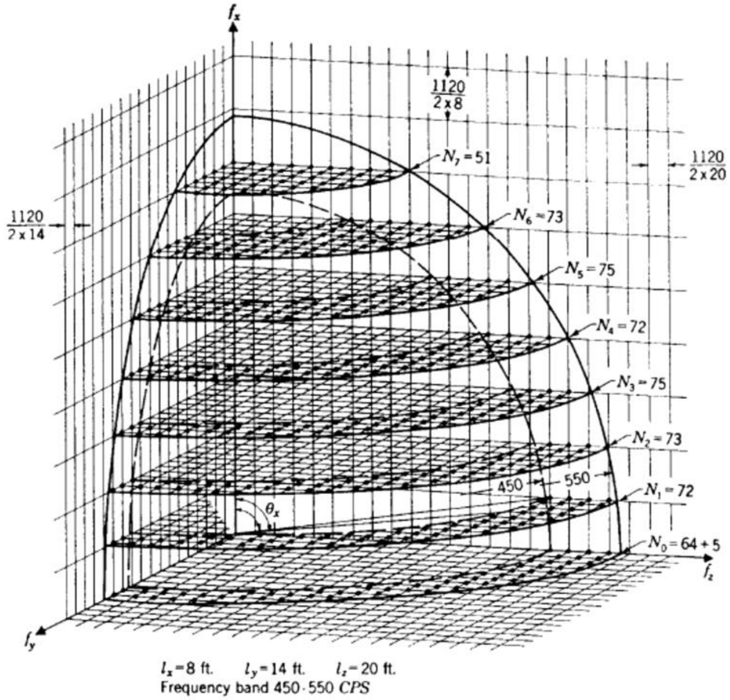
غرفة مستطيلة لها الأبعاد $l_x = 80\text{ft}$ ، $l_y = 14\text{ ft}$ و $l_z = 20\text{ft}$ ، تم إثارتها بمصدر صوت موضوع عند أحد زواياها. تم قياس ضغط الصوت المتكون عند زاوية أخرى من الغرفة. يولد مصدر الصوت شريط متصل من الترددات بين 450 هيرتز و550 هيرتز، له مستوى طيف منتظم، وقدرة خرج صوتية كلية مقدارها 1 واط. عند غلق مصدر الصوت، تم الحصول على منحنى اضمحلال خطى ($\log p$ مقابل t) له ميل مقداره 30 ديسيبل/ث.

(أ)عين بيانيا عدد الأنماط الطبيعية للاهتزاز المثارة بواسطة المصدر، (ب) عين زاوية السقوط التقريبية لمجال الموجة – المسافرة المتضمن الجدران عند $x = 0$ و $x = l_x$ في كل من التجميعات الرئيسية للترددات الطبيعية المبينة في البناء البياني، (ج) عين زمن الصوت المنعكس T ، (د) عين ثابت الاضمحلال k ، (هـ) عين عرض منحنى الرنين عند نقط نصف القدرة (3 ديسيبل أسفل)، عين مستوى ضغط الصوت عند قمة الرنين لكل نمط اهتزاز ، بفرض القسم المساوي من الطاقة بين أنماط الاهتزاز وأن K في المعادلة يساوى $U_o P_o / V$ ، حيث U_o هو ج م م شدة المصدر المعرف في الجزء العاشر (المعادلة 10.4).

الحل

(أ) يعطى الحل البيانى للمعادلة 10.5 في الشكل 10.9. يكون تردد أى نمط طبيعى للاهتزاز هو المسافة من نقطة أصل المحاور إلى إحدى الكرات السوداء المبينة. تلك التردد سوف يتركب من ثلاث مركبات تعطى بواسطة $c n_x / 2l_x$ ، $c n_y / 2l_y$ ، و $c n_z / 2l_z$. لاحظ أنه على طول المحور الرأسى تحدث ترددات طبيعية بزيادات (بفواصل) $\frac{1120}{16}$ ، وعلى طول المحور اليمين بزيادات $\frac{1120}{40}$ ، وعلى طول المحور المتبقى بزيادات $\frac{1120}{28}$. على الطبقة المسماة N_o ، يوجد 69 تردد طبيعى. العدد الكلى للترددات الطبيعية بين 450 هيرتز و550 هيرتز لهذه الغرفة يكون 560. التردد المتوسط هو 500 هيرتز.

(ب) يمكن تقسيم زوايا السقوط θ_x إلى ثمانية مجموعات رئيسية كما هو مبين في الشكل 10.9. تكون الزوايا كما يلي:



الشكل 9.10 مخطط التردد الطبيعي، مرسوم على مقياس غرفة $20\times14\times8\text{ft}$ مستطيلة بجدران صلبة. تم حذف معظم الخطوط الرأسية للتوضيح.[4]

$$
\begin{aligned}
\theta_x(0,n_y,n_z) &\doteq 90^\circ \\
\theta_x(1,n_y,n_z) &\doteq \cos^{-1}\left(1120/16\cdot 1/500\right) \doteq 82^\circ \\
\theta_x(2,n_y,n_z) &\doteq \cos^{-1}\left(\frac{2\cdot 1120}{16\cdot 500}\right) \doteq 74^\circ \\
\theta_x(3,n_y,n_z) &\doteq \cos^{-1}(0.42) \doteq 65^\circ \\
\theta_x(4,n_y,n_z) &\doteq \cos^{-1}(0.56) \doteq 56^\circ \\
\theta_x(5,n_y,n_z) &\doteq \cos^{-1}(0.70) \doteq 45^\circ \\
\theta_x(6,n_y,n_z) &\doteq \cos^{-1}(0.84) \doteq 33^\circ \\
\theta_x(7,n_y,n_z) &\doteq \cos^{-1}(0.98) \doteq 11^\circ
\end{aligned}
$$

(ج) معدل الاضمحلال يكون 30 ديسيبل/ث، وزمن الانعكاس يكون زمن الاضمحلال 60 ديسيبل (أنظر الجزء الرابع والعشرون).

(د) $k=6.91/T=3.46\sec^{-1}$ ، أنظر المعادلة 32.10.

(هـ) $f''-f'=k_n/\pi=1.1\ \text{Hz}$.

(و) القدرة المستمدة لكل نمط اهتزاز تكون $W_n=\frac{1}{560}=0.00179\ watt$. من المعادلة

4.4 نرى أنه للمصدر البسيط، U_o ترتبط بالقدرة $W_n=4\pi r^2 I$ بالعلاقة،

$$U_o^{\ 2}\frac{W_n c}{\pi f^2\rho_o}=\frac{(0.00179)(344.8)}{\pi(500)^2(1.18)}$$

أو

$$U_0 = 0.000816\ \text{m/sec}$$

$$p_n = \frac{U_0\gamma P_0}{k_n V} = \frac{8.16\times10^{-4}\times1.4\times10^5}{3.46\times(8\times14\times20)\times0.0283}$$

$$= 0.521\ \text{newton/m}^2$$

$$\text{SPL} = 20\log_{10}\frac{0.521}{2\times10^{-5}} = 88.3\ \text{db}$$

الجزء الرابع والعشرون – مجالات الصوت في الأوعية الكبيرة المشكلة بدون انتظام

6.10 مقدمة

للأوعية الكبيرة المشكلة بدون انتظام أيضا لها أنماط اهتزاز تستجيب عندما تدفع عند ترددها الطبيعية. لكن، يكون عددها كبير جدا وتوزيع ضغطها معقد للغاية لدرجة أن عندما يثير مصدر الصوت الغرفة فإنه يبدأ موجات موقوفة التى تشمل كل جدار عند كل زوايا السقوط تقريبا، حتى إذا انحصرت في شريط ترددى ضيق. أيضا، عند أى نقطة في الغرفة، تسافر موجات الصوت في كل الاتجاهات، بالتالى يمكننا الحديث عن مجال الصوت في الغرفة كمجال صوت منتشر.

عندما يثير مصدر الصوت، ذو الشريط الضيق المتكون من ترددات كثيرة، غرفة كبيرة مشكلة بدون انتظام، نلاحظ تأرجحات لضغط الصوت عندما يتحرك الميكروفون حول الغرفة، تماما كما سوف نلاحظ في الحالة البسيطة لغرفة صغيرة منتظمة الشكل. لكن، بالنسبة للغرفة الكبيرة المشكلة بدون انتظام، فإن القيم العظمى والصغرى في ضغط الصوت تقع قريبة بكثير جدا من بعضها البعض في المكان في الغرفة من حالة الغرفة المنتظمة، وتكون مسألة بسيطة نسبيا عملية تحريك الميكروفون للأمام وللخلف وبذلك يتم الحصول على متوسط فضائى مقبول لضغط الصوت.

7.10 علاقة شدة ـ طاقة ضغط – الصوت

إذا قرأ الميكروفون (ج م م) مستوى ضغط الصوت الفعال، الذي تم توسيطه في الفضاء بتحريك الميكروفون للأمام وللخلف على مسافة طول الموجة، يمكننا استعمال المعادلة 2ـ83 لتعطينا كثافة طاقة الصوت على الصورة.

$$D_{avg} = \frac{\left|p_{avg}\right|^2}{\rho_o c^2} \quad \text{watt} - \text{sec/m}^2 \qquad 10\text{-}15$$

حيث $\left|p_{avg}\right|^2$ ج م م مقدار ضغط الصوت متوسط في الفضاء وفي الزمن بالنيوتن لكل متر مربع، $\rho_o c$ المعاوقة المميزة للهواء بوحدات الرايليى في م كجم ث. عند الضغط ودرجة الحرارة الطبيعى، $\rho_o c = 407$ mks rayls.

8.10 متوسط المسار الحر

بالنسبة للغرفة الكبيرة المنتظمة الشكل يمكننا تصور الظروف الصوتية بتخيل موجة متنقلة حول داخل الغرفة. تسافر هذه الموجة في خط مستقيم حتى تصطدم بالسطح. حينئذ تنعكس الموجة على السطح بزاوية تساوى زاوية السقوط وتسافر في هذا الاتجاه الجديد حتى تصطدم بسطح أخر. وبما أن الصوت ينتقل بسرعة 1130 قدم/ث تقريبا، فإن العديد من الانعكاسات سوف تحدث كل ثانية.

من وجهة النظر الإحصائية، نعرف متوسط ـ المسار ـ الحر على أنه متوسط المسافة التى تسافرها موجة الصوت في الحجرة بين الانعكاسات من السطوح المحيطة.

عين العالم كنودصن[6] بطريقة عملية متوسط ـ المسار ـ الحر في 11 وعاء كبير مختلفة الشكل جدا ووجد أنها تتعطى بالعلاقة الأتية بشكل كبير،

$$\text{Meen free path} = d = \frac{4V}{S} \quad \text{m (or ft)} \qquad \text{10-16سلطان}$$

حيث V حجم الغرفة بالمتر المكعب (أو القدم المكعب) و S هى المساحة الكلية للغرفة بالتر المربع بما فيها الأرضية لكن بدون المساحة المتروكة للأثاث. تم اشتقاق هذه المعادلة نظريا أيضا.

9.10 معاملات امتصاص (طاقة الصوت، α_n و $\bar{\alpha}$

تعطى كثافة طاقة الصوت للموجة المتنقلة في غرفة بالمعادلة 10ـ15 بدلالة ضغط الصوت. بعد أن تمر هذه الموجة بالانعكاس من الجدار (الممتص) فإن كثافة الطاقة ستكون أقل خلال عبورها التالى للغرفة.

دعنا نعطى لكل سطح عاكس معامل امتصاص للصوت α_n يعرف بأنه النسبة بين الطاقة

الممتصة بواسطة السطح إلى الطاقة الساقطة على السطح. مع سفر الموجة حول الغرفة، فإنها تشمل الأسطح عند زوايا سقوط مختلفة. في الغرفة الكبيرة غير منتظمة الشكل يكون عدد الأمواج المسافرة عدد كبير جدا بحيث عند سطح يكون كل اتجاهات التدفق الساقط متساوية الاحتمال. لذلك، فإن معامل امتصاص الصوت يكون مأخوذ ليكون المتوسط لكل زوايا السقوط. معاملات الامتصاص الصوت المسجلة في الجداول المنشورة تكون مقاسة بشكل عام تحت ظروف تكون قريبة بقدر الإمكان من هذه الظروف. بالتالى فإن المعامل α_n يمكن الحصول علية مباشرة من المنشورات الرسمية[7,8].

علاوة على توسيط معاملات الامتصاص لكل زوايا السقوط على سطح واحد، فإننا سوف نوسط معاملات الامتصاص على الأسطح المختلفة في الغرفة، موزونة طبقا لمساحة كل منها كما يلى،

$$\overline{\alpha} = \frac{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + ... + S_n\alpha_n}{S} \qquad 10\text{-}17$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + ... + S_n \qquad 10\text{-}18$$

سلطان

حيث S_1 ، S_2 ، S_3 ،..... هى مساحات الأسطح الممتصة المعينة بالمتر المربع أو القدم المربع، α_1 ، α_2 ، α_3 ،..... هى معاملات الامتصاص المصاحبة لهذه الأسطح على وجه الترتيب، و $\overline{\alpha}$ هو معامل امتصاص الصوت المتوسط للغرفة ككل. إذا انطبقت هذه الشروط، بمعنى أن موجات الصوت ذات كثافة الطاقة المتساوية تقريبا تسافر بشكل متساوى الاحتمال في كل الاتجاهات، فإنه يكون من الضرورى ألا يكون أحد أجزاء الغرفة عبارة عن مادة لها امتصاص يشد الانتباه (أى مختلف بشكل كبير). تكتب المعادلة 10-17 على افتراض إما أن يكون $\overline{\alpha}$ صغير جدا أو أن كل الأسطح لها نفس معاملات الامتصاص تقريبا. من الشائع عند ممارسة التصميم التى توفر ظروف مقبولة للاستماع ألا تكون المواد الممتصة مركزة على الأسطح في جزء واحد من الغرفة، بل يجب أن تكون موزعة بشكل متماثل. علاوة على ذلك، من غير المحتمل أن يوجد مجال صوت منتشر في الغرفة عندما يصبح $\overline{\alpha}$ أكبر بكثير من 0.3، لأن الموجة الجوالة تنقرض بسرعة كبيرة.

لاحظ أن معامل الامتصاص α_n يكون مقياس حقيقى لقدرة الامتصاص لوحدة المساحة (متر^2 أو

قدم^2)من السطح المحيط في الغرفة. عند وجود نافذة مفتوحة في الغرفة، فإن كل الطاقة الساقطة على المساحة المفتوحة سوف تمر للخارج ولا شيء سينعكس. بالتالى، بالنسبة للنافذة المفتوحة $\alpha_n = 1.0$ [9]. لذلك، فإن امتصاص مساحة المادة الصوتية أو سطح أخر في الغرفة يتم التعبير عنه بدلالة مساحة مكافئة للنافذة المفتوحة. على سبيل المثال، من الممكن أن يمتص جدار مساحته 10 قدم مربع نفس النسبة المئوية من طاقة الصوت الساقط مثل نافذة مفتوحة مساحتها 4 قدم مربع. بالتالى α_n للجدار تساوى 0.4.

لكل المواد معاملات امتصاص مختلفة عند ترددات مختلفة. للحصول على المواصفات الكاملة لخصائص امتصاص للمواد، تكون الحاجة إلى رسم α كدالة في التردد. الممارسة القياسية لتحديد معاملات امتصاص الصوت في مراجع المصنعين تكون المعاملات مقاسة عند 125، 250، 500، 1000، 2000، و4000 هيرتز. في مناقشة إداء المواد على نحو سريع، حرت العادة على تحديد الأداء عند 500 هيرتز.

يحب أيضا أن الأخذ في الاعتبار التأثيرات الصوتية لكل من الناس، الكراسى، المقاعد، المناضد، الأدراج وغيرها، والتى هى أشياء ليست جزء من الأسطح المحيطة للغرفة. من المعتاد تخصيص عدد $S\alpha_n$ لكل شخص أو شيء وإضافته إلى البسط في المعادلة 10-17. على سبيل المثال، إذا كان في الغرفة 20 شخص جالس، وإذا كان العدد $S\alpha_n$ لكل شخص جالس عند تردد معين هو 4، حينئذ يجب إضافة 80 وحدة إلى بسط المعادلة 10-17. لا يتم عمل تعديل للمساحة الكلية S .

للاستخدام في حل المسائل، تم إعطاء قيم نموذجية لمعاملات الامتصاص للمواد الشائعة وللمقاعد والناس كما تم قياسها في غرف انعكاس [10]. الرسوم البيانية لمعاملات الامتصاص لبلاط صوتى مثالي له مثقبة مع تقريبا 450 فتحة لكل قدم مربع، وكل فتحة قطرها 3\16 بوصة أعطيت في الأشكال 10-10 و10-11. في الشكل 10-12 نبين تأثير تغير حجم الفتحة والفراغات بينها في لوح معدنى أستخدم لتغطية 3 بوصة صوف صخرى. يبين الشكل 10-13 البيانات النموذجية لبلاط مسامى ومتجانس ذات ثخانات مختلفة. يمكن الحصول على البيانات التفصيلية للمواد

المتوفرة تجاريا من المصادر المعطاة في المراجع 7 و8.

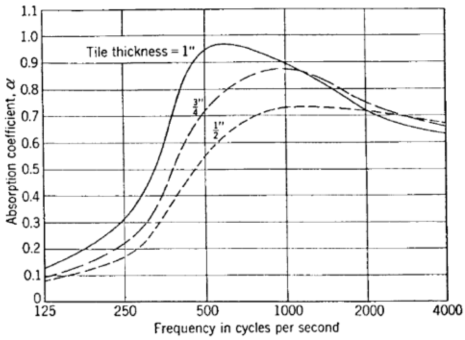
الجدول 10ـ1 معاملات مواد البناء العامة*

Building material	Thickness, in.	Coefficients					
		125	250	500	1000	2000	4000
Brick wall, unpainted	18	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
Brick wall, painted	18	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Plaster, gypsum, on hollow tile, plain or painted	.....	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
Plaster, gypsum, scratch and brown coats on metal lath, on wood studs	.....	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.03
Plaster, lime, sand finish on metal lath	3/4	0.04	0.05	0.06	0.08	0.04	0.06
Plaster, on wood wool	.....	0.40	0.30	0.20	0.15	0.10	0.10
Plaster, fibrous	2	0.35	0.30	0.20	0.55	0.10	0.04
Poured concrete, unpainted	.....	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Poured concrete, painted	.....	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Wood, solid and polished	2	0.1	....	0.05	....	0.04	0.04
Wood, paneling, 2 to 4 in. air space behind	3/8–1/2	0.30	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10
Wood platform with large space beneath	.....	0.4	0.3	0.2	0.17	0.15	0.1
Glass	.....	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
Floors:							
Slate on solid	.....	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Wood on solid	.....	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02
Cork, linoleum, gypsum, or rubber tile on solid	3/16	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02
Wood block, pitch pine	.....	0.05	0.03	0.06	0.09	0.10	0.22
Carpets:							
Wool pile, with underpad	5/8	0.20	0.25	0.35	0.40	0.50	0.75
Wool pile, on concrete	3/8	0.09	0.08	0.21	0.26	0.27	0.37
Draperies and fabrics:							
Velour, hung straight							
10 oz/yd²	.....	0.04	0.05	0.11	0.18	0.30	0.35
14 oz/yd²	.....	0.05	0.07	0.13	0.22	0.32	0.35
18 oz/yd²	.....	0.05	0.12	0.35	0.48	0.38	0.36
Velour, draped to half area							
14 oz/yd²	.....	0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60
18 oz/yd²	.....	0.14	0.35	0.55	0.75	0.70	0.60
Seats and people ($\alpha_n S$ in square feet per person or per seat):							
Seats							
Chair: upholstered back, leather seats	.....	2.0	2.5	3.0	3.0	3.0	2.5
Chair: theater, heavily upholstered	.....	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Orchestra chairs, wood	.....	0.1	0.15	0.2	0.35	0.5	0.6
Cushions for pews, per person	1.5	1.0	1.5	1.7	1.7	1.6	1.4

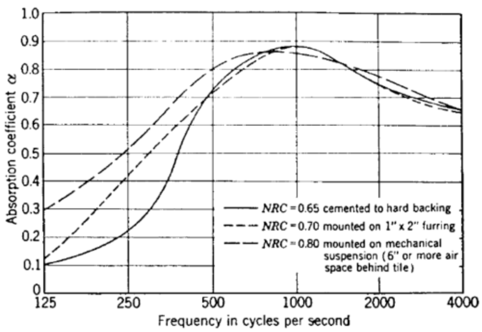
* مجمعة ومتوسطة بواسطة الناشر من البيانات المنشورة. عدم التوافق الكبير بين البيانات المنشورة تجعل الأرقام الدقيقة مستحيلا

(تكملة) الجدول 10.1 معاملات مواد البناء العامة

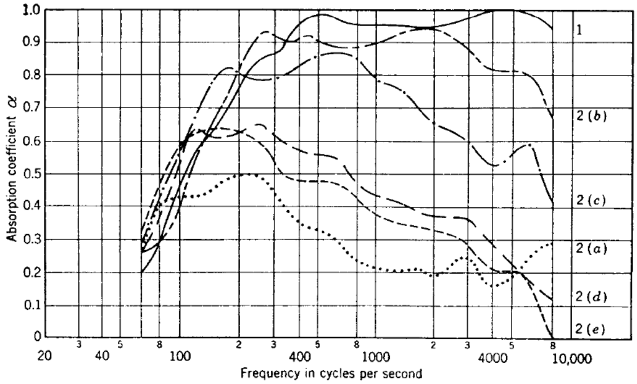
Building material	Thickness, in.	Coefficients					
		125	250	500	1000	2000	4000
People							
In upholstered seats (add to leather-seat chair absorption)...	.....	0.7	0.6	0.5	1.3	1.6	2.0
In heavily upholstered seats......	.....	0.7	0.6	0.6	1.0	1.0	1.0
In orchestra seats with instruments (add to wood-seat absorption)......................	.....	4.0	7.5	11.0	13.0	13.5	11.0
Child in high school, seated, including seat..................	.....	2.2	3.0	3.3	4.0	4.4	4.5
Child in elementary school, seated, including seat...............	.....	1.8	2.3	2.8	3.2	3.5	4.0
Standing.......................	.....	2.0	3.5	4.7	4.5	5.0	4.0
In church pew (no seat cushion)..	.....	2.5	2.7	3.3	3.8	4.0	3.8



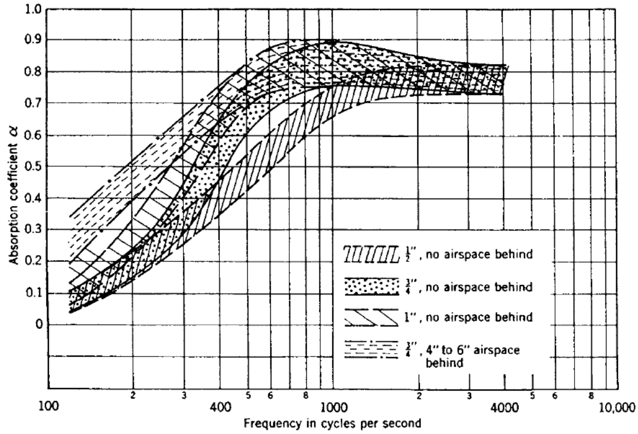
الشكل 10.10 معاملات الامتصاص المتوسط لبلاط عاكس ملصوق مباشرة على خلفية صلبة. عدد الفتحات في السطح العاكس يكون بين 400 و500 للقدم المربع ويكون القطر بين 32/5 و16/3 بوصة.



الشكل 11.10 تأثير التثبيت على معامل تخفيض الضوضاء لبلاط عاكس 4\3 بوصة. الكمية NRC هي معامل تخفيض – الضوضاء تم الحصول عليه بتوسيط المعاملات عند 250، 500، 1000، و2000 هيرتز مقربة إلى أقرب 0.05.



الشكل 10ـ12 التغير في الامتصاص مع المسافة الفاصلة بين الفتحات في لوح معدني غطاء لمنضدة طلاء: 1ـ صوف صخري 3 بوصة غير مغطى. 2ـ صوف صخري 3 بوصة مغطى بلوح صلب 22 Bwg (a) غير عاكس، (b) فتحات 1\8 بوصة عند فتحات مراكز 5\16 بوصة، (c)) فتحات 1\8 بوصة عند مراكز 5\8 بوصة، (d) فتحات 1\8 بوصة عند مراكز 5\4 بوصة، (e) فتحات 1\8 بوصة عند مراكز 15\8 بوصة (من مختبر الفيزياء الدولي، إنجلترا).



الشكل 10ـ13 منحنيات تبين المناطق المحتملة لمعاملات امتصاص الصوت لبلاط صوتي مسامي بسيط أو مشقوق ومثبت إلى جدار صلب كما هو مبين. القيم المنشورة المقاسة سوف تقع عادة خلال المجالات المبينة، بالرغم من وجود استثناءات مهمة.

10ـ10 معدل الاضمحلال

يمكن إيجاد معدل اضمحلال الصوت في غرفة كبيرة غير منتظمة بسهولة.[11,12] افترض أن مصدر الصوت قد توقف بالكاد وأن الصوت يضمحل في الغرفة. د ع

$$t'=\frac{d}{c}=\frac{4V}{cS} \quad \text{sec} \qquad 10\text{-}19$$

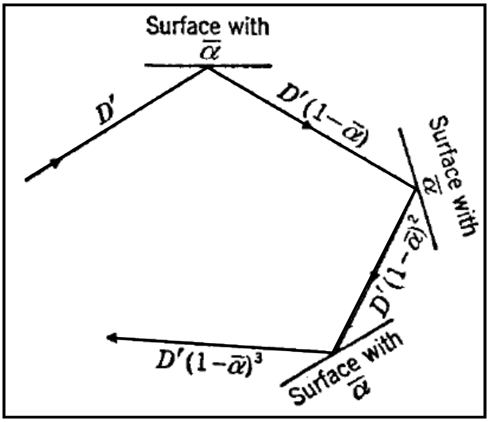
حيث t' الزمن بالثانية لكى تسافر موجة الصوت مسار حر واحد، c سرعة الصوت بالمتر/الثانية، و $d = 4V/S$ متوسط ـ المسار ـ الحر بالمتر (أنظر المعادلة 10ـ16).

افترض أن كثافة الطاقة الابتدائية للصوت كانت D' واطـثانيةــ\م^3. حينئذ بعد nt' ثانية فإن موجة الصوت تكون قد عانت من n من الانعكاسات. في كل انعكاس سوف تقل كثافة الطاقة عند تلك اللحظة بمقدار $\overline{\alpha}$ (انظر الشكل 10ـ14). بالتالى، تكون كثافة الطاقة D بعد كل انعكاس متتالى على الصورة،

$$D(t') = D'(1-\overline{\alpha})$$
$$D(2t') = D'(1-\overline{\alpha})^2$$
$$D(nt') = D'(1-\overline{\alpha})^n \qquad \text{سلطان} 10\text{-}20$$

لكن

$$n = \frac{t}{t'} \qquad 10\text{-}21$$



الشكل 10ـ14 مسار موجة صوت لها كثافة طاقة D' بينما تنعكس من سطح له متوسط معامل امتصاص $\overline{\alpha}$. تبتعد الأسطح عن بعضها بمسافة تساوى متوسط ـ المسار ـ الحر $d = 4V/S$.

بالتالى، من المعادلة 10ـ19 نحصل على،

$$D(t) = D'(1-\overline{\alpha})^{(cS/4V)t} \qquad \text{سلطان} 10\text{-}22$$

الأن،

$$1-\overline{\alpha} \equiv e^{\log_e(1-\overline{\alpha})} \qquad 10\text{-}22$$

حينئذ،

$$D(t) = D'e^{-(cS/4V)[og_e(1-\bar{\alpha})]t} \qquad 10\text{-}24$$

حيث $D(t)$ كثافة الطاقة بعد زمن t.

إذا حولنا هذه الكثافة إلى مستوى ضغط الصوت بمساعدة المعادلات 15.10 و 18.1 نحصل على،

$$10\log_{10}\left[\frac{|p_{avg}|^2}{(0.00002)^2}\right]_{t=t} = 10\log_{10}\left[\frac{|p_{avg}|^2}{(0.00002)^2}\right]_{t=0} - 4.34\frac{cS}{4V}\left[-\log_e(1-\bar{\alpha})\right]t \quad \text{db} \qquad 10\text{-}25\text{سلطان}$$

$$\text{SPL}_{t=t} - \text{SPL}_{t=0} = 1.085\frac{cS}{V}\left[-2.30\log_{10}(1-\bar{\alpha})\right]t \quad \text{db} \qquad 10\text{-}26$$

(لاحظ أن $\log_{10} e^x = 0.43x$ ، $\log_e 10^x = 2.30x$ ، و $\log_e y = 2.30\log_{10} y$)

بالتالي، يضمحل مستوى ضغط الصوت عند المعدل،

$$1.085\frac{cS}{V}\left[-2.30\log_{10}(1-\bar{\alpha})\right] \quad \text{db/sec} \qquad 10\text{-}227$$

وحدات الامتصاص المترية

سوف نعرف ثابت اختياري a' على النحو

$$a' \equiv S\left[-2.30\log_{10}(1-\bar{\alpha})\right] \equiv \text{metric absorption units in } \text{m}^2 \qquad 10\text{-}28\text{سلطان}$$

حيث S تعطى بالمعادلة 12.10.

وحدات الامتصاص بالسابين

للحالة الخاصة للوحدات الإنجليزية، فإن الكمية a' في المعادلة 28.10 تسمى a، وهذه الكمية هى عبارة عن رقم للامتصاص يقاس بوحدات تسمى السابين ولها الأبعاد قدم مربع.

عمليا، $\bar{\alpha}$ توجد من المعادلة 17.10، والكمية $\left[-2.30\log_{10}(1-\bar{\alpha})\right]$ توجد من $\bar{\alpha}$ باستخدام المخطط المعطى في الشكل 15.10. حينئذ يتم الحصول على a بضرب S للمعادلة 18.10

بالقدم المربع في هذه النتيجة.

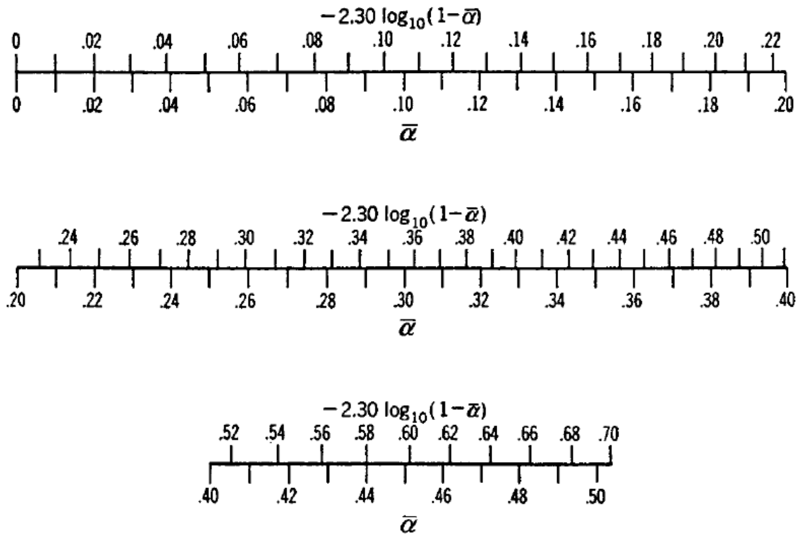
11ـ10 امتصاص الحد فقط.

زمن التراداد T (Reverberation time)

يعرف زمن التراداد (الارتداد) T بأنه الزمن اللازم لكثافة طاقة الصوت لكى تضمحل إلى 60 ديسيبل، بمعنى، إلى 10^{-6} من قيمته الأصلية. من المعادلات 10ـ27 و10ـ28، نرى أن زمن التراداد يكون،

$$T = \frac{60V}{1.085ca'} \quad \text{sec} \qquad 10\text{-}29$$

حيث V حجم الغرفة بالمتر المكعب، c سرعة الصوت بالمتر لكل ثانية، و a' وحدات الامتصاص المترى.



الشكل 15.10 مخطط يعطى $-2.30\log_{10}(1-\bar{\alpha})$ **كدالة في** $\bar{\alpha}$.

الوحدات المترية

بالنسبة للوحدات المترية، عند درجة الحرارة الطبيعية (22^{o}C or 71.6^{o}F)، يكون زمن التراداد على الصورة،

$$T = 0.161\frac{V}{a'} \quad \sec \qquad 10\text{-}30$$

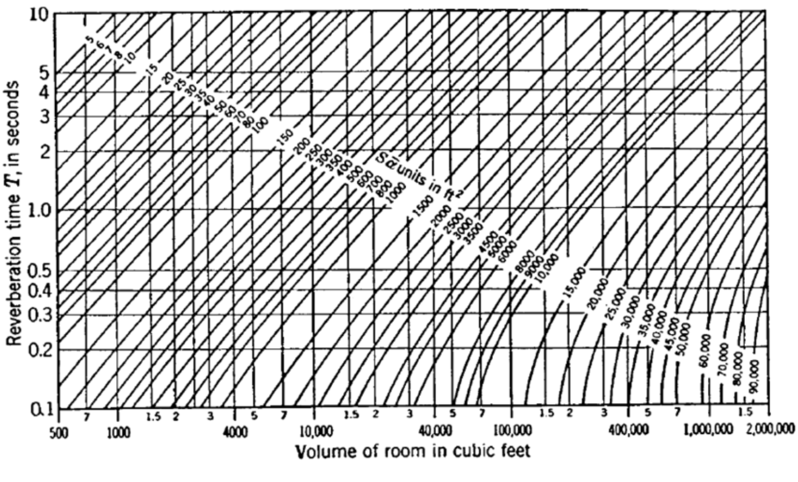
الوحدات الإنجليزية

بالنسبة للوحدات الإنجليزية، عند درجة الحرارة الطبيعية ($22^oC \quad or \quad 71.6^oF$)، يكون زمن التردد على الصورة،

$$T = 0.049\frac{V}{a} \quad \sec \qquad 10\text{-}31$$

حيث V حجم الغرفة بالمتر المكعب، و a وحدات امتصاص بالسابين (قدم مربع).

يمكن إيجاد زمن التردد T ، كدالة لحجم الغرفة وحاصل الضرب $S\overline{\alpha}$ للحجرة (أنظر المعادلة 10ـ17)، مباشرة من الشكل 10ـ16، للغرف التى لها أكبر بعد أصغر من خمسة أمثال أصغر بعد. إن استعمال هذا المخطط يتفادى استعمال الشكل 10ـ15، حيث تكون العلاقة بين حاصل الضرب $S\overline{\alpha}$ و a مشاركة بشكل آلى في الصيغة في مدى 5 بالمائة دقة.



الشكل 10ـ16 علاقات بين زمن الرداد، حجم، ووحدات $S\overline{\alpha}$ بالقدم المربع. تم مشاركة تصحيح $-2.30\log_{10}(1-\overline{\alpha})$. أقصى خطأ في زمن التردد يكون أقل من 5٪ ، للغرف التى لها أكبر بعد يكون خمسة أمثال البعد لأصغر.

ثابت الاضمحلال k_n

كمادة إضافية من الاهتمام، يجب أن نلاحظ أنه إذا تم تسوية أس المعادلة 10ـ24، الذي يعطي

نسبة اضمحلال كثافة طاقة الصوت، بضعف أس المعادلة 10ـ14(أى $2k_n$)، الذي يعطي نفس الكمية، فإننا حصل على

$$2k_n = \frac{cS}{4V}\left[-\log_e(1-\overline{\alpha})\right] = \frac{ca'}{4V}$$

أو، من المعادلة 10ـ29

$$k_n = \frac{15}{(2)(1.085T)} = \frac{6.91}{T} \quad \sec^{-1} \qquad 10\text{-}32$$

بمعنى أخر، إذا اضمحل مستوى ضغط الصوت مع الزمن على مدى 60 ديسيبل، حينئذ كل الأنماط المهمة للاهتزاز تملك نفس ثابت الاضمحلال k_n وهذا الثابت يساوى 6.91 مقسوم على زمن التردد T.

10ـ12 امتصاص الهواء والمحيط

يمتص الصوت ليس فقط عند حدود الغرفة ولكن أيضا في الهواء نفسه. إذا كانت الغرفة صغيرة، فإن عدد الانعكاسات من الحدود في كل ثانية يكون كبيرا ويكون الزمن المقابل التى تقضيه الموجة في الهواء بين الانعكاسات صغيرا. في هذه الحالة، يكون امتصاص الهواء غير مهم. في قاعة الاستماع (الصالة) الكبيرة جدا، يصبح الزمن التى تقضيه الموجة في الهواء بين الانعكاسات كبيرا الأمر الذي معه لم يعد في المقدور إهمال امتصاص الطاقة في الهواء نفسه.

يمكن تعديل معادلات التردداد 10ـ29 و10ـ31 لتأخذ في الاعتبار امتصاص الهواء إذا كانت الدقة مطلوبة. يكون هذا ضرورى بوجه خاص عند الترددات العالية (فوق 1000 هيرتز)، كما سنرى باختصار.

بالرجوع إلى المعادلة10ـ20، نرى أن كل مرة تعبر الموجة فيها الموجة الغرفة، فإنها تعانى من الانعكاس وتنخفض كثافة الطاقة بمعامل الامتصاص $\overline{\alpha}$. بعد زمن t، يكون الصوت قد عانى من t/t' من الانعكاسات، حيث t' هو الزمن التى تسافر فيه الموجة مسافة تساوى متوسط ـ المسار ـ الحر.

في الفترة التى تعبر فيها الموجة مسافة تساوى متوسط ـ المسار ـ الحر، فإن كثافة الطاقة سوف تقل

نتيجة امتصاص الهواء بمفردة طبقا للعلاقة،

$$D(t') = D' e^{-md}$$ سلطان 10-33

حيث $D'(t)$ كثافة الطاقة (واط ـ ثانية\م^3) بعد سفر الموجة مسافة متوسط مسار حر واحد، D' كثافة الطاقة الابتدائية عند زمن $t = 0$، m ثابت اضمحلال الطاقة بوحدات م$^{-1}$، d طول متوسط المسار الحر بالمتر.

بعد زمن t، تكون الموجة قد عانت من t/t' من الانعكاسات وتكون قد سافرت مسافة مقدارها $t\,d/t'$. بالتالي، تعطى كثافة الطاقة بمساعدة المعادلات 10ـ16، 10ـ19، و10ـ22 بالعلاقة،

$$D(t) = D'(1-\overline{\alpha})^{(cS/4V)t} e^{-(cS/4V)(4V/S)md}$$ سلطان 10-34

أو

$$D(t) = D'(1-\overline{\alpha})^{(cS/4V)[-\log(1-\overline{\alpha})\cdot 4Vm/S]t}$$ سلطان 10-35

زمن الترداد Reverberation Time

عند التحول للزمن اللازم لاضمحلال مقداره 60 ديسيبل، نحصل على معادلات الترداد.

الوحدات المترية

$$T = \frac{60V}{1.085c(a'+4mV)}$$ سلطان 10-36

حيث T زمن الترداد بالثانية، V حجم الغرفة بالمتر المكعب، c سرعة الصوت بالمتر لكل ثانية، a' عدد وحدات الامتصاص المترى المعطى بالمعادلة 10ـ28، و m ثابت اضمحلال الطاقة بالمتر$^{-1}$ كما هو معطى من المعادلات 10ـ38 و10ـ39أ.

الوحدات الإنجليزية

بالنسبة للوحدات الإنجليزية، عند درجة الحرارة الطبيعية (22^oC or 71.6^oF)، يكون زمن الترداد متضمنا امتصاص الهواء على الصورة،

$$T = 0.049\frac{V}{a'+4mV}$$ سلطان 10-37

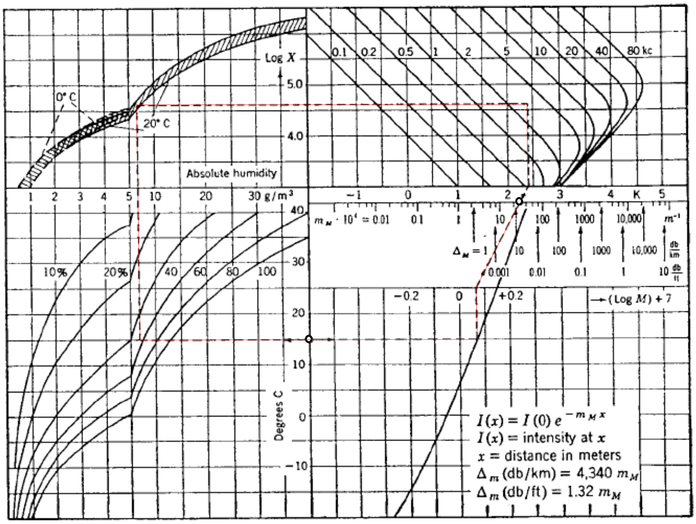
حيث V حجم الغرفة بالمتر المكعب، a وحدات الامتصاص بالسابين (قدم مربع)، و m ثابت اضمحلال الطاقة بالقدم$^{-1}$ كما هو معطى من المعادلات 10-38 و10-39ب أو من المعادلة 10-18.

تعيين ثابت اضمحلال الطاقة m.

تتكون الكمية m (ثابت اضمحلال الطاقة) من جزئين. جزء ينشأ من تأثيرات اللزوجة والتوصيل الحراري في الغاز والجزء الأخر ينشأ من تأثيرات الامتصاص الجزيئى والتبديد في الغازات المتعددة الذرات مشتملة على تبادل طاقة انتقالي واهتزازى بين الجزيئات المتصادمة.

بالنسبة للهواء، يعطى الجزء الأولى بالمعادلة،

$$m_1 = 4.24 f^2 \times 10^{-11} \quad \text{m}^{-1} \qquad \text{10-38}$$



الشكل 10-17 رسوم بيانية لتعيين ثابت الاضمحلال في الهواء المتسبب بالهواء، m_M.

يتم الحصول على الجزء الثانى، m_m، من الشكل 10-17. لتعيين m_m من الشكل 10-17، طبقا للطريقة المستخدمة أدناه:

1-إبدء بدرجة الحرارة المناسبة بالدرجة المئوية والتحرك إلى اليسار من الخط المركزى السفلى للرسم البيانى (15^o C في المثال المبين).

2- توقف عند خط الرطوبة النسبية المناسب (50% R.H. في المثال المبين).

3ـتحرك رأسيا إلى الحافة السفلى للمنطقة المظللة. ثن تحرك لليمين إلى كنتور التردد المناسب (3000 هيرتز في المثال المبين).

4ـثن تحرك إلى أسفل إلى التدريج K ($K = 2.4$ في المثال المبين).

5ـإبدء بدرجة الحرارة مرة أخرى وتحرك إلى اليمين إلى المنحنى السفلى على اليمين ومن هناك إلى أعلى إلى تدريج $\log M + 7$ (في المثال المبين، $\log M + 7 = +0.07$).

6ـثم وصل نقط النهاية للاقتفاءين بخط مستقيم (تكون قيمة m_m في المثال المبين $0.003\ \mathrm{m}^{-1}$) إن قيمة m تساوى مجموع الجزئيين،

$$m = m_1 + m_m \qquad \text{10-39أ}$$

أو

$$m = 0.305\,(m_1 + m_m) \quad \mathrm{ft}^{-1} \qquad \text{10-39ب}$$

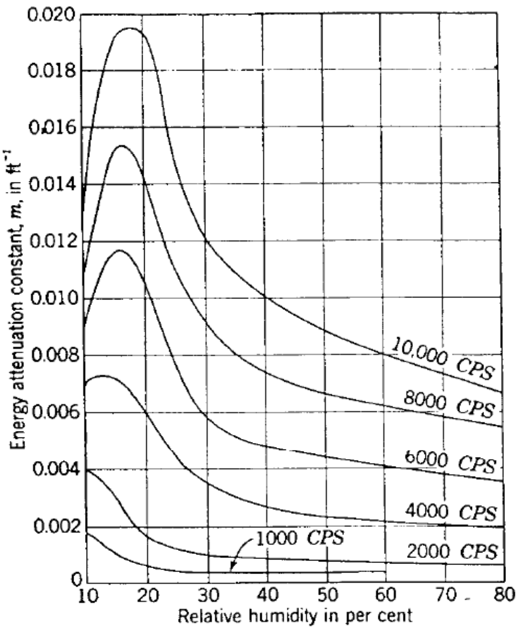
حيث m_1 تعطى بالمعادلة 10ـ38 و m_m تعطى بالشكل 10ـ17، وكلاهما بالوحدات المترية.

عند درجة الغرفة الطبيعية ($F \approx 68^o\mathrm{F}$)، تم رسم الكميات المقاسة المكافئة للمعادلة 10ـ39ب في الشكل 10ـ18 كدالة في الرطوبة النسبية بالنسبة المئوية.[13] هذه الكميات تكون أعلى من المحسوبة من المعادلة 10ـ39ب لأسباب ليست مفهومة بالكامل. من الشائع عمليا استخدام القيم المقاسة في حلول مسائل خاصة.

كمعلومات عرضية، العدد بالديسيبل التى تضمحله الموجة في سفرها خلال الهواء لكل وحدة مسافة يكون على الصورة،

$$\Delta_m = 4.34m \quad \text{db/unit distance} \qquad \text{10-40}$$

إن زمن الرداد T ذو أهمية خاصة في تصميم قاعات الاستماع وصالات الموسيقى وإستديوهات الإذاعة والغرف. سوف نتحدث في الباب 13 عن كيفية اختيار T لأى وعاء.



الشكل 10ـ18 قيم مقاسة لثابت اضمحلال الطاقة m كدالة في الرطوبة النسبية للترددات المختلفة، $I(x) = I_o \exp(-mx)$. تم افتراض أن درجة الحرارة هي 68^o F تقريبا.[13]

10ـ13 كثافة الطاقة الصوتية للحالة – الثابتة الترددية

بعد تشغيل مصدر الصوت، تمد الطاقة للغرفة بواسطة المصدر عند معدل أسرع من معدل امتصاص ة عند أسطح الحدود يتم تتحقق حالة من الاتزان. في حالة الاتزان، تتساوى الطاقة الممتصة مع الطاقة المستمدة بالمصدر.

من المناسب تقسيم المجال الصوتى إلى جزئيين متميزين، مجال الصوت المباشر ومجال الصوت المرتد. من التعريف، إن مجال الصوت "يوجه" حتى بعدما تمر الموجة من المصدر بانعكاس ها الأول بالكاد. يضم مجال الصوت المرتد كل الموجات الصوتية بعدما تعاني كلها من انعكاس ها الابتدائي.

يشع المصدر الصوتى قدرة بالواط إلى الغرفة. من هذه القدر سوف يمتص الجزء W_D بواسطة الجدار عند زمن الانعكاس الأول، والجزء W_R سوف يمتص خلال الانعكاسات المتتالية. من الواضح أن $W = W_D + W_R$، بإهمال الامتصاص في الهواء الأن.

امتصاص الحد فقط

إذا كان مصدر الصوت غير موجها وكان موضوعا في مركز الغرفة، فإن موجات الصوت الكروية المنبعثة بواسطته سوف تمر بانعكاس بعد سفرها مسافة متوسط ـ المسار – الحر. يكون للجدران التى تنعكس منها الموجات معامل امتصاص متوسط $\bar{\alpha}$. بالتالى، فإن القدرة المستمدة بواسطة المصدر المصاحبة للموجة المباشرة تساوى القدرة الممتصة عند الانعكاس الأول. تكون هذه القدرة من التعريف على الصورة،

$$W_D = W\bar{\alpha} \qquad 10\text{-}41$$

وتكون القدرة المستمدة بواسطة المصدر إلى مجال الصوت المتردد على الصورة،

$$W_R = W(1-\bar{\alpha}) \qquad 10\text{-}42$$ سلطان

دعنا نناقش مجال الصوت المرتد اولا. تكون قيمة الحالة –الثابتة لكثافة الطاقة المرتدة هى D'.

عدد الانعكاسات في الثانية الواحدة من أسطح لها متوسط امتصاص $\bar{\alpha}$ يساوى $1/t' = cS/4V$. حينئذ تكون الطاقة المرتدة الكلية المحذوفة من الغرفة في الثانية الواحد هى،

$$D'V\frac{\bar{\alpha}}{t'} = W_R$$

$$\frac{D'cS\bar{\alpha}}{4V}V = W(1-\bar{\alpha})$$

أو

$$D' = \frac{4W(1-\bar{\alpha})}{cS\bar{\alpha}} \qquad 10\text{-}43$$ سلطان

حيث D' كثافة طاقة صوت المرتدة بالواط-ثانية لكل متر مكعب. W القدرة الكلية الممدودة بواسطة المصدر بالواط، V حجم الغرفة بالمتر المكعب، c مساحة أسطح الغرفة بالمتر المربع، و $\bar{\alpha}$.

من المعادلتين 10ـ15 و10ـ43 نحصل على،

$$\left|p_{avg}\right|_R^2 = \frac{4\rho_o cW}{R'} \qquad 10\text{-}44$$ سلطان

حيث من التعريف،

$$R' = \frac{S\overline{\alpha}}{1-\overline{\alpha}} = \text{room constant, m}^2 \qquad 10\text{-}45$$

حيث S من التعريف

$$R = \frac{S\overline{\alpha}}{1-\overline{\alpha}} = \text{room constant, ft}^2 \qquad 10\text{-}46$$ سلطان

حيث S بالقدم المربع

يرى من المعادلة 10ـ44 أن ج م م ضغط الصوت، متوسط في الزمن والفضاء يتناسب تناسب طردى مع المقدرة المنبعثة بواسطة المصدر ويتناسب عكسيا مع ثابت الغرفة R .

امتصاص الهواء والحدود

التخفيض في كثافة الطاقة لموجة الصوت نتيجة امتصاص الهواء إثناء اجتيازها مسافة تساوى متوسط المسار الحر تساوى $D'\exp(-4mV/S)$. في زمن t سوف تصنع الموجة الصوتية عدد t/t' من إجتيازات متوسط المسار الحر، حيث $t' = 4V/cS$ هو الزمن اللازم للموجة لعمل إجتياز واحد للغرفة. القدرة الكلية الممتصة من الموجات المرتدة في الغرفة سوف تساوى القدرة الممتصة عند الحدود زائد القدرة الممتصة في الهواء.

$$\text{Power absorbed at boundaries} = D'V\left(\frac{cS}{4V}\right)\overline{\alpha} \qquad 10\text{-}47$$

$$\text{Power absorbed in air} = D'V\left(\frac{cS}{4V}\right)\left(1-e^{4mV/S}\right) \qquad 10\text{-}48$$

$$\text{Power absorbed from reverberant sound field} = W\,e^{4mV/S}\left(1-\overline{\alpha}\right) \qquad 10\text{-}49$$

المعادلة 10ـ47 زائد 10ـ48 تساوى 10ـ49 أو

$$D' = \frac{W(1-\overline{\alpha})\,e^{4mV/S}}{cS\left[(\overline{\alpha}+1)+e^{-4mV/S}\right]} \qquad 10\text{-}50$$

سلطان

بالتقريب،

$$D' = \frac{4W\left[1-\left(\overline{\alpha}+\dfrac{4mV}{S}\right)\right]}{cS\left[\overline{\alpha}+(4mV/S)\right]} \qquad 10\text{-}51$$ سلطان

دع

$$R'_T = \frac{S[\bar{\alpha} + (4mV/S)]}{1-[\bar{\alpha} + (4mV/S)]} = \frac{S\bar{\alpha}_T}{1-\bar{\alpha}} \qquad \text{10-52سلطان}$$

حيث

$$\bar{\alpha}_T = \bar{\alpha} + \frac{4mV}{S} \qquad \text{10-53}$$

بدلا عن ذلك،

$$R_T \equiv \frac{S\bar{\alpha}_T}{1-\bar{\alpha}_T} \equiv \text{total room constant, ft}^2 \qquad \text{10-54}$$

حينئذ، بالوحدات المترية،

$$\frac{|P_{avg}|_R^2}{\rho_o c^2} = D' = \frac{4W}{cR'_T} \qquad \text{10-55سلطان}$$

أو

$$|P_{avg}|_R^2 = \frac{\rho_o cV}{R'_T} \qquad \text{10-56}$$

المعادلة 10ـ56 تشبه تماما في الشكل المعادلة 10ـ44 ماعدا أن معامل الامتصاص المتوسط قد ازداد بمقدار $4mV/S$.

10-14 كثافة طاقة صوت الحالة – الثابتة الكلية

مصدر الصوت غير الموجه

بالقرب من مصدر الصوت النقطى، فإن شدة الصوت تكون أكبر منها عند النقطة البعيدة. إذا كان المصدر صغير بشكل كافي وكانت الغرفة غير عاكسة، فإن المجال الصوتى بالقرب جدا من تلك المصدر لا يكون معتمد على خصائص الغرفة. بأسلوب أبسط، عندما تكون أذن أحد الأفراد على بعد بضع بوصات فقط من فم شخص أخر، فإن الغرفة المحيطة بهما تكون مهملة التأثير على ما يسمعه المستمع عندما يتحدث الشخص الأخر. عند المسافات الأكبر من المصدر، تتناقص شدة مجال الصوت المباشر، وفي أخر الأمر يسود مجال الصوت المرتد.

إذا كنا على مسافة تبعد أكثر من ثلث الطول الموجى من مركز مصدر نقطتى، فإن كثافة الطاقة عند نقطة r تكون على الصورة،

$$D_r \approx \frac{|p_r|^2}{\rho_o c^2}$$ سلطان 10-57

حيث D_r كثافة الطاقة عند نقطة تبعد مسافة r من مركز مصدر كروي d بالواط-ثانية لكل متر مكعب، و p_r مقدار ج م م ضغط الصوت عند نفس النقطة بالنيوتن للمتر المربع.

يرتبط ضغط الصوت نتيجة المصدر الكروي مع القدرة المشعة بالعلاقة،

$$\frac{|p_r|^2}{\rho_o c^2} = \frac{W}{4\pi r^2 c}$$ سلطان 10-58

بضم معادلات كثافات الطاقة الصوتية المباشرة والمرتدة 10-44 و10-58، نحصل على ضغط متوسط-المربعات $|p|^2$ عند أي نقطة تبعد مسافة r عن المصدر في الغرفة على الصورة،

$$|p|^2 = W\rho_o c\left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R'}\right)$$ 10-59

بالتعبير على صورة مستوى ضغط الصوت بالديسيبل، نحصل على،

$$\text{SPL} = 10\log_{10} W + 10\log_{10}\rho_o c + 94 + 10\log_{10}\left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{1}{R'}\right) \quad \text{db}$$ 10-60

حيث SPL مستوى ضغط الصوت بالديسيبل مرجعي 0.0002 ميكروبار (0.00002 نيوتن لكل متر مربع) عند مسافة r من المصدر، W القدرة المنبعثة بواسطة المصدر بالواط، $\rho_o c$ المعاوقة المميزة للهواء بوحدات الرايلي في م كجم ث. عند $22^o\text{C}(71.6^o\text{F})$ و $751\,\text{mm Hg}$ فإن $10\log_{10}\rho_o c = 10\log_{10} 470 = 26.1\ \text{db(mks units)}$. r المسافة من مركز المصدر بالمتر، $R' = S\overline{\alpha}/(1-\overline{\alpha})$ هو ثابت الغرفة بالمتر المربع. إذا وجد امتصاص هواء فإن $\overline{\alpha}$ تستبدل بـ $\overline{\alpha}_T$ في المعادلة 10-17. S مساحة الأسطح المحيطة للغرفة بالمتر المربع (أنظر المعادلة 10-18).

أخيرا، بتذكر مستوى القدرة PWL يكون

$$\text{PWL} = 10\log_{10}\frac{W}{10^{-12}} = 10\log_{10}W + 130 \ \ \text{db} \qquad 10\text{-}61$$

وبالوحدات المترية نحصل على

$$\text{SPL} = \text{PWL} + 10\log_{10}\rho_o c - 36 + 10\log_{10}\left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R'}\right) \ \ \text{db} \qquad 10\text{-}62$$ سلطان

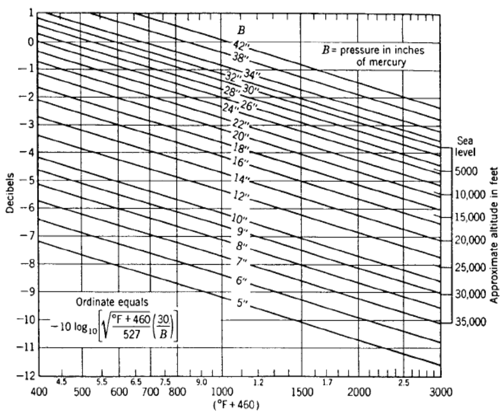
بالوحدات الإنجليزية، تكون SPL ، W ، $\rho_o c$ ، و $\overline{\alpha}$ كما هي معطاة بعد المعادلة 10ـ60،
لكن r^2 ، R و S تكون بالقدم المربع. نحصل على،

$$\text{SPL} = \text{PWL} + 10\log_{10}\rho_o c - 25.6 + 10\log_{10}\left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right) \ \ \text{db} \qquad 10\text{-}63$$ سلطان

عند درجة الحرارة الطبيعية والضغط ($71.6^o\text{F and } 30\text{in.Hg}$)،

$$\text{SPL} = \text{PWL} + 10\log_{10}\left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right) + 0.5 \quad \text{db} \qquad 10\text{-}64$$ سلطان

حيث r المسافة من مركز المصدر بالقدم، و R ثابت الغرفة بالقدم المربع (أنظر المعادلات 10ـ46 و10ـ54). تم إعطاء تصحيحات درجة الحرارة والضغط الجوى في الشكل 10ـ19. تضاف هذه الأعداد إلى مستوى ضغط الصوت المعطى بالمعادلة 10ـ64.

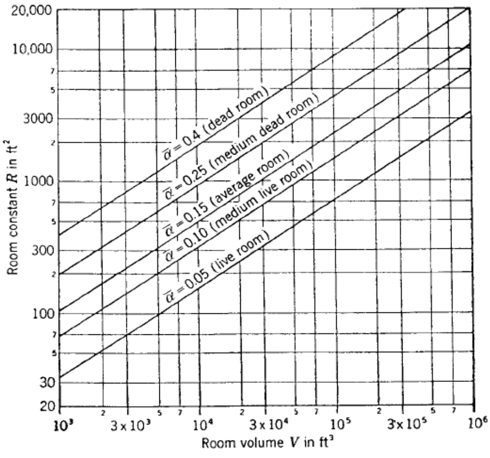


الشكل 10ـ19 تصحيحات درجة الحرارة والضغط الجوى الواجب إضافتها إلى المعادلات 10ـ64، 10ـ66، 10ـ73، و10ـ75. درجة الحرارة بدرجات الفهرنهيت والضغط الجوى بالبوصة زئبق، B . يكون تصحيح الصفر عند 71.6^oF و 30in.Hg .

يبين الشكل 10ـ20 قيم ثابت الغرفة R كدالة في حجم الغرفة لغرف ذات شكل طبيعى. يكون المعامل في المنحنيات هو معامل متوسط الامتصاص $\overline{\alpha}$ أو $\overline{\alpha}_T$ إذا وجد امتصاص هواء.

يمكن إدراك المعنى الفيزيائى للمعادلات السابقة بسهولة أكثر بدراسة الشكل 10ـ21. يبين هذا الشكل أنه، عند الضغط ودرجة الحرارة القياسيين، مستوى ضغط الصوت بالديسيبل نسبة إلى مستوى القدرة بالديسيبل، مع ثابت الغرفة R بالقدم المربع كمتغير.

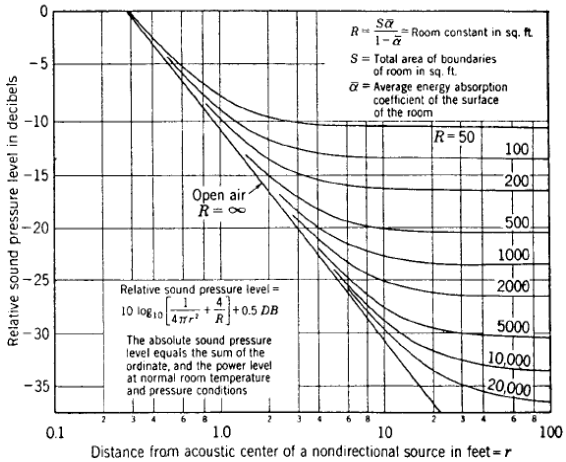
دعنا ننظر بالتفصيل على منحنى الـ $R = 1000\ \ (\mathrm{ft}^2)$. عندما يكون ميكروفون الملاحظة خلال 3 قدم من مصدر صوتى كروي متصل، فإن مستوى ضغط الصوت يكون تقريبا مثله كما لو كانت الغرفة غير موجودة. بمعنى أن، يكون الضغط مختلف بأقل من 1 ديسيبل عنه في الهواء الطلق. على الجانب الأخر، عندما يكون المصدر على مسافة أبعد من 20 قدم من مركز المصدر، فإن مستوى ضغط الصوت في المتوسط ثابت عند كل المواضع في الغرفة. كما ذكرنا من قبل، عند قياس ضغط الصوت من الضرورى تدوير أو تحريك الميكروفون على مدى طول موجي للحصول على ج م م المتوسط للموجات الموقوفة في الغرفة.



الشكل 10ـ20 قيمة ثابت الغرفة R كدالة في حجم الغرفة لغرف لها نسب الأبعاد 1:1.5:2. هذه النسب تعطى $S = 6.25V^{2/3}$. المتغير هو معامل متوسط امتصاص الصوت للغرفة. إن التقديرات الشخصية "ميت" و"حى" وغيرها من مسميات الغرف في الشكل، هى تقديرات المؤلف وليست بالضرورة استعمال قياسي.

على سبيل المثال العملي، من الواضح أن العامل مع رأسه القريبة جدا من الماكينة الصاخبة سوف يستفيد فائدة صغيرة جدا من زيادة مقدار الامتصاص المتوسط في الغرفة، بمعنى زيادة

R . لكن ، العامل الموجود على بعد من الماكينة سوف يتعرض لمستوى ضغط صوت 3 ديسيبل أقل مع كل مضاعفة لثابت الغرفة R .



الشكل 21.10 مخطط لتعيين مستوى ضغط الصوت في غرفة كبيرة غير منتظمة متولد بمصدر صوت غير موجه. المحور الرأسى عبارة عن مستوى ضغط الصوت بالديسيبل منسوب إلى مستوى قدرة المصدر. المتغير هو ثابت الغرفة R بالقدم المربع كما هو معرف في الرسم. على سبيل المثال، R تساوى 1000 عند 9 قدم من مركز المصدر تعطى قراءة المحور الرأسى 22.5 db – . إذا كان مستوى قدرة 125 db ، فإن ضغط الصوت عند 9 قدم سوف يكون 102.5 db.

مصدر صوت موجه صغير

في الفقرات السابقة، تعاملنا مع مصادر غير موجهة، لذلك كان الاتجاه الذي تقاس فيه r غير مهما. يمكن تحديد توجيهية مصدر على امتداد أى خط قطرة (يسمى محور) بواسطة معامل التوجيهية Q . إن معامل التوجيهية هو ببساطة النسبة بين متوسط ـ مربعات ضغط الصوت p^2 المتولد بمصدر الصوت عند نقطة بعيدة عن المصدر ومتوسط ـ مربعات ضغط الصوت الذي سوف يتولد عند نفس النقطة بواسطة مصدر صوت غير موجه له نفس القدرة. بالطبع، هذه الكمية لا تكون دالة في المحور المختار فقط لكن أيضا دالة في مكان المصدر في الغرفة، ولمعظم المصادر، دالة في التردد.

لا تعتمد كثافة طاقة الصوت المرتد على المكان في الغرفة، ما عدا بالنسبة للتأرجحات نتيجة موجات موقوفة، وتتناسب مع القدرة الكلية المشعة بواسطة المصدر. بالتالى، يكون لمعامل

التوجيهية تأثير قليل على كثافة طاقة الصوت المرتدة أو مستوى ضغط الصوت المصاحب له. يحدث استثناء لهذه الحالة عندما يشع مصدر الصوت العالى التوجيه صوت عند سطح ذو امتصاص عالى جدا في الغرفة. حينئذ يحدث انعكاس صغير جدا ليولد مجال صوت مرتد.

تتناسب كثافة الطاقة الصوتية المباشرة على ى محور مع معامل التوجيهية Q . لذلك، يجب علينا ببساطة عمل تصحيح لجزء من المعادلة 10ـ62. هذه المعادلة في الوحدات المترية تصبح على الصورة،

$$\text{SPL} = \text{PWL} + 10\log_{10}\rho_o c - 36 + 10\log_{10}\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right) \text{ db} \qquad 10\text{-}65$$

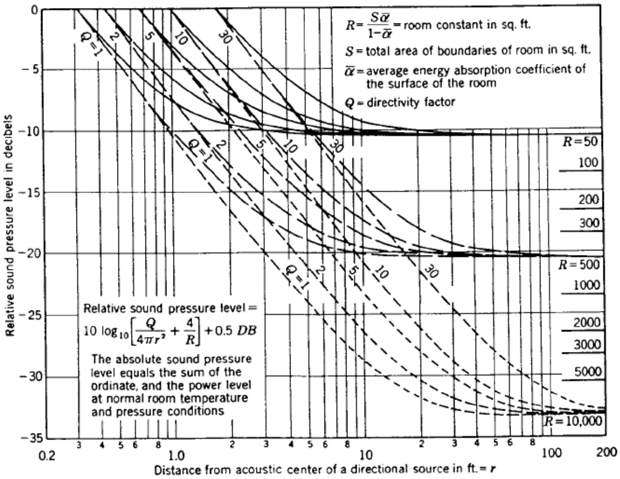
حيث كل الرموز معرفة بعد المعادلة 10ـ60 و PWL تعطى بالمعادلة 10ـ61. في درجة حرارة الغرفة والضغط الطبيعى ، و r^2 و R بالقدم المربع، نحصل على،

$$\text{SPL} = \text{PWL} + 10\log_{10}\rho_o c + 10\log_{10}\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right) + 0.5 \text{ db} \qquad 10\text{-}66$$

تم إعطاء تصحيحات درجة الحرارة والضغط الجو في الشكل 10ـ19. تضاف هذه الإعداد إلى مستوى ضغط الصوت المعطى بالمعادلة 10ـ66.

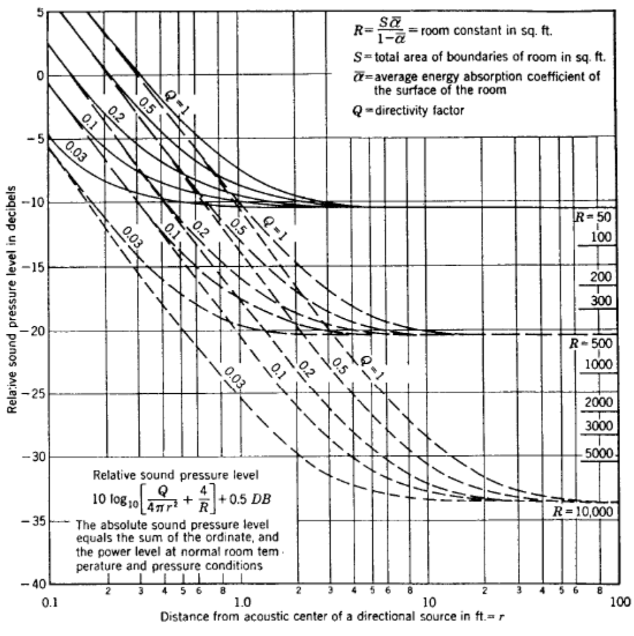
تم رسم المعادلة 10ـ66، لقيم Q أكبر من الوحدة، في الشكل 10ـ22 ، ولقيم Q الأقل من الوحدة، في الشكل 10ـ23 . نرى بوضوح أنه حتى ولو كان المصدر موجها، فإن أجزاء المنحنيات المعينة بالصوت المرتد تكون غير معتمدة تقريبا على Q . مع ذلك، إذا كانت Q أكبر من الوحدة، فإن مجال الصوت المباشر يمتد مسافة أكبر منها في حالة أن Q تساوى أو أصغر من الوحدة.

على سبيل ، إذا كانت $Q = 16$ ، فإنه يتحقق أن يكون مجال الصوت المباشر عند $R = 1000\ \text{ft}^2$ يكون سائدا حتى 15 قدم، ومجال الصوت المرتد غير سائد حتى 40 قدم . مع ذلك، عند $Q = 1/4$ ، فإن مجال الصوت المباشر عند $R = 1000\ \text{ft}^2$ يكون سائدا فقط حتى 1.0 قدم، ومجال الصوت المرتد غير سائد في حدود 5 قدم. في هذه الأمثلة، افترضنا أن المصادر تكون صغيرة بدرجة كافية لأن نكون في "مجالها – البعيد".



الشكل 10ـ22 نفس الشكل 10ـ19 ماعدا أن مصدر الصوت مصدر موجها مع معامل التوجيهية أكبر من الوحدة.

حتى عندما يكون المصدر غير موجه إسميا، فإن معامل التوجيهية Q يعتمد على موضع المصدر في الغرفة. على سبيل المثال، نرى من الشكل 4ـ20 أنه إذا وضع مصدر غير موجه في مستوى الجدار، فإن $Q = 2$ لأن القدرة تكون مشعة إلى فضاء نصف كروى فقط.



الشكل 10ـ23 نفس الشكل 10ـ19 ماعدا أن مصدر الصوت مصدر موجها مع معامل التوجيهية Q يكون أقل من الوحدة.

في الجدول 10ـ2 نبين قيم Q لأربعة اماكن لمصدر غير موجه صغير في غرفة كبيرة.

الجدول 10ـ2 نبين قيم Q لمصدر غير موجه صغير في أماكن نموذجية في غرفة مستطيلة كبيرة.

المكان في الغرفة	Q
بالقرب من المركز..	1
في مركز جدار واحد	2
عند الحافة ، منتصف المسافة بين الأرضية والسقف	4
عند الزاوية	8

ذكرنا سابقا إنه عندما يكون الوعاء صغيرا، فإنه سوف يتفاعل مع المصدر ليعدل القدرة المشعة. سواء سيعتبر الوعاء صغيرا أم لا فإنه يعتمد على شيئين اثنين. الأول وهو الأكثر أهمية يكون النسبة بين متوسط طول المسار الحر والطول الموجى. في حالة كون الغرفة "كبيرة" فإن طول المسار الحر يجب أن يساوى عدة أطوال موجية. الثانى، يجب أن تكون الغرفة غير منتظمة الشكل أو غير ذلك يجب أن تحتوي على أشياء غير منتظمة مثل أثاث، دواليب، نوافذ مثبتة، إطارات صور كبيرة، شاشات متحركة، وما شابه. يتفق الكثير من غرف المعيشة مع المتطلب الثانى بشكل جيد، لكن يكون طول المسار الحر أقل من عدة مرات من الطول الموجى أسفل 200 هيرتز تقريبا. مثل تلك الغرفة تكون غرفة "صغيرة" عند الترددات المنخفضة أسفل 200 هيرتز، وتكون غرفة "كبيرة" عن الترددات العالية.

إذا أردت أن يشع مصد الصوت قدرة كبيرة بقدر الإمكان في غرفة "صغيرة" شبه – مستطيلة، فإن أفضل مكان للمصدر الصوتى يكون عند زاوية عند الأرضية أو مستوى السقف. تحت هذه الظروف، فإن المعاوقة الصوتية الممثلة للمصدر تكون بالشكل الذي يسحب من المصدر قدرة عند الترددات المنخفضة أكبر مما تكون عندما يوضع في أى مكان أخر في الغرفة.

على سبيل المثال، يبين الشكل 10ـ24 مستويات ضغط الصوت المتوسط في غرفة شبه – مستطيلة لسماعة بمشعاع – مباشر موضوعة عند كل من الأماكن الأربعة المبينة بالشكل. من الواضح أن القدرة المشعة من السماعة تكون أكبر بثمانية مرات (أكبر بـ 9 ديسيبل) عند الترددات المنخفضة عندما توضع عند الزاوية مقارنة مع عند وضعها عند مركز الغرفة تماما. عند

التردد الأعلى من 500 هيرتز، فإن مستوى ضغط الصوت المرتد لا يعتمد على موضع السماعة، الأمر الذي يوضح أن قدرة خرج هذه السماعة لا تتأثر بالتفاعل مع الغرفة (لأن الغرفة كبيرة).

أخيرا، نلاحظ ان كثافة متوسط الطاقة المباشرة D_D ترتبط بالقدرة المشعة بواسطة المصدر بغض النظر عن معامل التوجيهية له بالعلاقة،

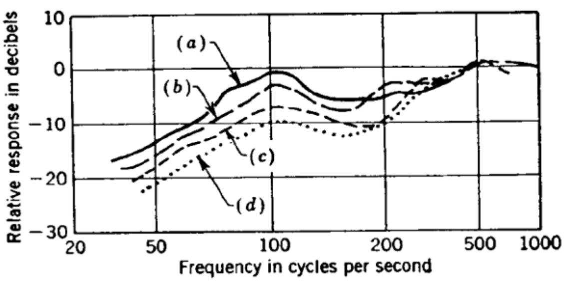
$$D_D = \frac{W\,t'}{V} \qquad 10\text{-}67$$

حيث t' زمن متوسط المسار الحر. من المعدلة 10ـ19 نحصل على،

$$D_D = \frac{4W}{c\,S} \qquad 10\text{-}68$$ سلطان

مصدر مصوت كبير يغطي جدار واحد من الغرفة

عندما توجد غرفتان متاخمتان ويكون مصدر الصوت موجود في أحداهما، فإننا يمكن أن نعتبر الصوت الذي يمر من خلال الجدار المشترك بينهم كما لو أنه قادم من مصدر كبير يغطي كامل الجدار في الغرفة الثانية. دعنا نعتبر أن الحجرة المستقبلة مستطيلة تقريبا ولها الحجم $V = S_W L$ ، حيث S_W مساحة الجدار المشع و L طول الغرفة العمودى على هذا الجدار. نرغب تعيين كثافة الطاقة الصوتية في الغرفة كدالة في مساحة الجدار وثابت الغرفة. سوف نفترض كما سبق أن للغرفة عدم انتظام كافي وأنها كبيرة بدرجة تكفي إنتاج مجال صوتى مرتد منتشر.



الشكل 10ـ24 استجابة تردد سماعة لأربعة أماكن (a) عند زاوية غرفة مستطيلة، (b) عند مركز أحد الحوائط في مستوى الأرضية، (c) عند مركز أحد الحوائط في منتصف المسافة بين الأرضية والسقف، و(d) معلقة في مركز الغرفة بالضبط. المنحنيات عبارة عن نسخة منعمة من البيانات الأصلية.

سوف تتكون كثافة الطاقة الصوتية من جزئيين: الجزء المباشر والجزء المرتد. يكون الجزء المرتد غير معتمد تقريبا على شكل، حجم، ومكان المصدر في الغرفة. الجزء المباشر سوف يساوى كثافة الطاقة الصوتية للموجة التى تغادر الجدار المشع وتسافر مسافة L عبر الغرفة، وعند ذلك تعانى من الانعكاس الأول.

يكون الجزء المرتد من كثافة الطاقة الصوتية، من المعادلة 10ـ43، على الصورة

$$D' = \frac{4W}{cR'} \tag{10-69}$$

الجزء المباشر من كثافة الطاقة الصوتية يساوى القدرة لوحدة الحجوم مضروبة في الزمن t اللازم لسفر الصوت الطول L للغرفة، بمعنى $t = L/c$، بالتالى،

$$D_D = \frac{W\,L}{V\,c} = \frac{W\,L}{S_W\,L\,c} = \frac{W}{S_W\,c} \tag{10-70}$$

حيث S_W مساحة الجدار المشع بالمتر المربع، L طول الغرفة العمودى على الجدار المشع بالمتر.

تكون كثافة الطاقة الصوتية الكلية عبارة عن مجموع المعادلات 10ـ69 و10ـ70، أى،

$$D_T = \frac{4W}{c\,S_W}\left(\frac{1}{4} + \frac{S_W}{R'}\right) \tag{10-71}$$

بدلالة ضغط الصوت، باستخدام المعادلة 10ـ15 نحصل على،

$$|p|^2 = \frac{4W\rho_o c}{S_W}\left(\frac{1}{4} + \frac{S_W}{R'}\right) \tag{10-72}$$

تمت البرهنة على صلاحية هذه المعادلة في مدى التردد فوق 150 هيرتز لغرفة لها الأبعاد $L = 16\ \text{ft}$ و $S_W = 9 \times 12 = 108\ \text{ft}^2$ بواسطة العالم لندن[14].

في الاستنتاج السابق، اعتبرنا أن الصوت المباشر يكون "مشعوع" عبر الغرفة. هذا سوف لا يكون حقيقى في العادة، ماعدا بالقرب جدا من الجدار. هذا الافتراض، وبالتالى، المعادلة 10ـ72 تصلح في المجال "المجال – القريب" والذي يوجد خلال مسافة من الجدار تساوى تقريبا نصف عرض اللوحة.

بالتعبير بالوحدات الإنجليزية والديسيبل، نحصل على مستوى ضغط الصوت في المجال – القريب،

$$\text{SPL} = \text{PWL} + 10\log_{10}\left(\frac{1}{S_W} + \frac{4}{R}\right) + 0.5 \quad \text{db} \qquad 73\text{-}10 \text{ سلطان}$$

حيث PWL تكون كما هى معطاة في المعادلة 10-61 وتكون القدرة المشعة بواسطة الجدار، و S_W مساحة الجدار المشع بالقدم المربع، $R = \bar{\alpha}S(1-\bar{\alpha})$، S المساحة الكلية لكل أسطح الغرفة بالقدم المربع، $\bar{\alpha}$ معامل الامتصاص المتوسط للغرفة.

في "المجال البعيد"، بمعنى أن المسافة من الجدار تكون كبيرة، فإن مستوى ضغط الصوت سيكون في مكان ما بين ذلك المعطى بواسطة المعادلة 10-73 وذلك المعطى بالعادلة 10-66، مع $Q = 2$.

تم كتابة المعادلة 10-73 لظروف درجة حرارة الغرفة الطبيعية ومعدل الضغط المعتاد. في حالة درجات الحرارة والضغط الأخرى تضاف التصحيحات في الشكل 10-19 إلى مستويات ضغط الصوت المحسوبة بواسطة هذه المعادلة. أيضا، إذا وجد امتصاص هواء يتم استبدال R بـ R_T كما هو معطى بالمعادلة 10-54.

10-15 أمثلة لحسابات صوتيات الغرفة

المثال 10-4

غرفة كبير غير منتظمة لها أبعاد تقريبية على النحو" العرض 150 قدم، الطول 200 قدم والارتفاع 40 قدم. مساحات الحوائط تكون من أربعة أنواع مختلفة. للسقف معامل امتصاص $\alpha_1 = 0.3$، لحوائط الجانب $\alpha_2 = 0.4$، للجدار الخلفي $\alpha_3 = 0.6$، وللجدار الأمامى والأرضية $\alpha_4 = 0.15$. تم وضع مصدر صوت له قدرة 10 واط صوتى في الغرفة. يوجد في الغرفة 100 شخص لكل منهم امتصاص $S\alpha$ تساوى 3.5 قدم مربع. عين (أ) متوسط المسار الحر، (ب) متوسط $\bar{\alpha}$، (ج) العدد الكلى لوحدات الامتصاص بوحدات السابين، (د) زمن الترداد للغرفة، (هـ) كثافة الطاقة الصوتية

المرتدة، (و) كثافة الطاقة الصوتية المباشرة، (ز) مستوى ضغط الصوت عند 20 قدم عند $Q=1$ وعند $Q=20$.

الحل

(أ) حجم الغرفة يكون $V=1.2\times10^6\ \text{ft}^3(3.4\times10^4\ \text{m}^3)$.

مساحة السطح الكلية تكون $S=8.8\times10^4\ \text{ft}^2(8.15\times10^3\ \text{m}^2)$

متوسط المسار الحر يكون $Mean\ free\ path=\dfrac{4\times1.2\times10^6}{8.8\times10^4}=54.4\ \text{ft}(16.6\ \text{m})$

(ب)

$$\begin{aligned}\overline{\alpha}&=\frac{S_1\alpha_1+S_2\alpha_2+S_3\alpha_3+S_4\alpha_4+(S\alpha\ \text{for people})}{\text{S}}\\&=\frac{0.9\times10^4+0.64\times10^4+0.36\times10^4+0.54\times10^4+0.035\times10^4}{8.8\times10^4}\\&=\frac{2.48}{8.8}\approx0.282\end{aligned}$$

(ج) العدد الكلى لوحدات الامتصاص بوحدات السابين يكون (أنظر الشكل 15ـ10)

$$\begin{aligned}a&=8.8\times10^4\left[-2.30\log_{10}(1-0.282)\right]\\&=8.8\times10^4\times0.33=2.9\times10^4\ \text{ft}^4\end{aligned}$$

(د) زمن التراداد يكون

$$T=\frac{0.049\times1.2\times10^4}{2.9\times10^4}\approx2.0\ \text{sec}$$

(هـ) تكون كثافة الطاقة الصوتية المرتدة (أنظر المعادلة 43ـ10)، في الوحدات المترية على النحو،

$$\begin{aligned}D'&=\frac{4W}{Sc}\ \frac{1-\overline{\alpha}}{\overline{\alpha}}\ \ \text{watts/m}^3\\&=\frac{4\times10\times(0.72/0.28)}{8.15\times10^3\times344.8}=3.66\times10^{-5}\ \ \text{watt/m}^3\end{aligned}$$

(و) كثافة الطاقة الصوتية المباشرة بالوحدات المترية (أنظر المعادلة 68ـ10) تكون،

$$D_D=\frac{4W}{Sc}=\frac{4\times10}{8.15\times10^3\times344.8}=1.42\times10^{-5}\ \ \text{watt/m}^3$$

ز) يكون مستوى القدرة هو

$$PWL = 10\log_{10} 10 + 130 = 140 \text{ db}$$

ثابت الغرفة يكون

$$R = \frac{S\overline{\alpha}}{1-\overline{\alpha}} = \frac{8.8\times 10^4 \times 0.28}{0.72} = 3.4\times 10^4 \quad \text{ft}^2$$

مستوى ضغط الصوت عند $Q = 1$ يعطى بالمعادلة 10ـ64

$$SPL = 140 + 10\log_{10}\left(\frac{1}{4\pi\times 400} + \frac{4\times 10^{-4}}{3.4}\right) + 0.5$$

$$= 140 - 35 + 0.5$$

$$\approx 105.5 \text{ db } re\ 0.0002 \text{ microbar}$$

مستوى ضغط الصوت عند $Q = 20$ يعطى بالمعادلة 10ـ66

$$\text{SPL} = 140 + 10\log_{10}\left(\frac{20}{4\pi\times 400} + \frac{4\times 10^{-4}}{3.4}\right) + 0.5$$

$$= 140 - 24 + 0.5$$

$$= 116.5 \text{ db } re\ 0.0002 \text{ microbar}$$

المثال 10ـ5

إن مستوى القدرة لمصدر الضوضاء في غرفة مجاورة يضمحل بمقدار 40 ديسيبل في عبور الجدار المشترك. إذا كان مصدر الضوضاء يشع 0.1 واط صوتي، ما مستوى ضغط الصوت في الغرفة الموصوفة في المثال 10ـ4، إذا كانت أبعاد الجدار المشترك 40 قدم في 150 قدم، (أ) بالقرب من الجدار، (ب) عند مسافة 100 قدم من الجدار؟

الحل

(أ) من المعادلة 10ـ73 بالقرب من الجدار نحصل على،

$$\text{SPL} = \text{PWL} + 10\log_{10}\left(\frac{1}{S_W} + \frac{4}{R}\right) + 0.5 \quad \text{db}$$

$$\text{SPL} = \text{PWL} + 10\log_{10}\frac{1}{10^{-13}} - 40 = 80 \quad \text{db}$$

$$S_W = 6000 \ \ \text{ft}^2$$

$$R = 3.4\times10^4 \ \ \text{ft}^2$$

$$\text{SPL} = 80 + 10\log_{10}(0.5\times10^{-4}) + 0.5 = 80 - 35.5 + 0.5 = 45 \ \ \text{db}$$

(ب) في المعادلة 10ـ66 نجد أن الحد الأول اللوغاريتم يساوي $2/(4\pi\times10^4) = 0.159\times10^{-4}$. في (أ)، الحد الأول يساوي $1/6000 = 1.67\times10^{-4}$. تقع الإجابة الحقيقية بين القيمتين، لذا دعنا نفترض بشكل اختيار أن يكون الحد الأول تساوي 0.5×10^{-4} . هذا يعطي،

$$\begin{aligned}\text{SPL} &= 80 + 10\log_{10}(0.5\times10^{-4} + 1.26\times10^{-4}) + 0.5\\ &= 80 - 37.5 + 0.5 \approx 43 \ \ \text{db}\end{aligned}$$

الجزء الخامس والعشرون – إرسال الصوت خلال الجدران بين الأوعية

15-10 فقد الإرسال (TL) وتخفيض الضواء (NR)

فقد الإرسال

عادة يتم التعبير عن سمات الجدار الموضوع بين غرفتين بدلالة فقد الإرسال (TL) بالديسيبل. يعرف فقد الإرسال بأنه النسبة (معبرة بالديسيبل) بين الطاقة الصوتية المرسلة خلال الجدار إلى الطاقة الصوتية الساقطة عليه. بما أن مساحة الجدار كما هى في البسط والمقام، فإنه يقال أن فقد الإرسال تطبق لوحدة المساحة. في الولايات المتحدة، تأخذ وحدة المساحة هذه عادة على انها $1\ \text{ft}^2$. رياضيا،

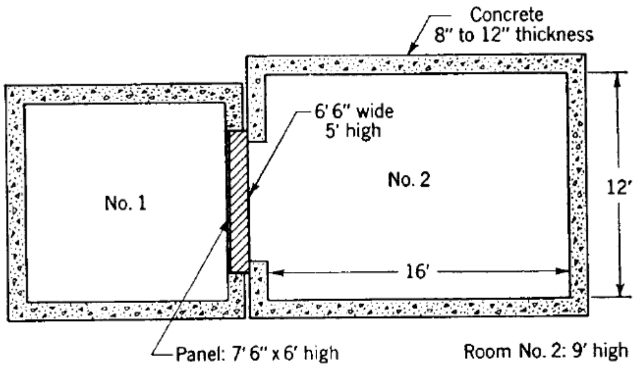
$$\text{TL} = 10\log_{10}\frac{W_1}{W_2} \equiv 10\log_{10}\frac{1}{\tau} \qquad 10\text{-}74$$

حيث W_1 القدرة الصوتية بالواط الساقطة على الجدار ذى المساحة S_W (مقاسة بواسطة جدار تام الامتصاص)، W_2 القدرة الصوتية بالواط المشعة بواسطة الجدار إلى فضاء تام الامتصاص ، و $\tau = W_2/W_1$ هو معامل الإرسال.

يمكن تعيين فقد الإرسال بواسطة الشكل التجريبي المبين بالشكل 10ـ25 والتى يستخدم بشكل شائع من قبل المكتب الدولى للقياس. يكون الجدار قيد الفحص 7 قدم في 6 قدم وارتفاعه 6 قدم، وتكون أبعاد المساحة المرسلة – للصوت للجهار 6 قدم في 6 قدم وعرضها 5 قدم. يوضع مصدر الصوت في الغرفة رقم 1، ويقاس الصوت المرسل في الغرفة رقم 2.

يقاس مستوى ضغط الصوت في كلتا الغرفتين بواسطة ميكروفون متحرك لقياس ج م م المتوسط في الفضاء. في الغرفة 1، يكون المصدر صغير في العادة، ويقاس مستوى ضغط الصوت في منطقة الترداد في الغرفة، بمعنى، حيث يكون ثابت الغرفة R صغيرا مقارنة مع $16\pi r^2$، وتكون Q تساوى الوحدة أساسا.[16] في الغرفة 2، إما أن يقاس الصوت عن طريق توسيط مستوى ضغط الصوت على كامل حجم الغرفة أو توسيطه على مستوى موازى للجدار وقريب جدا منه. يوصى العالم لندن بالتقنية الأخيرة. لقد بين أيضا أنه إذا تم عمل القياسات بالقرب جدا من جدار

في غرفة شديد الترداد، فإن مستويات ضغط الصوت تكون حوالي 2.5 ديسيبل أعلى من تلك التى يتم الحصول عليها بتوسيط مجال الصوت في الغرفة. هذا الرقم يكون متوقعا من الجزء السابق ويؤكد النتيجة التى تم الحصول عليها في المثال 10ـ5.



الشكل 10ـ25 شكل غرفتين يستخدم في المكتب العالمى للقياس لقياس إرسال الصوت خلال لوحات. يتم تثبيت اللوحة قيد الفحص بين الغرفتين 1 و2. يوضع المصدر في الغرفة 1.

يرتبط مستوى متوسط ضغط الصوت المرتد في الغرفة 1 مع مستوى قدرة المصدر في تلك الغرفة (أنظر المعادلة 10ـ64) بالعلاقة،

$$\mathrm{SPL}_1 \approx \mathrm{PWL} + 10\log_{10}\frac{4}{R_1} \quad \text{db} \qquad 10\text{-}75 \text{ سلطان}$$

حيث $\mathrm{PWL} = 10\log_{10}(W/10^{-12})\ \text{ db } re\, 10^{-13}\ \text{ watt}$، W القدرة الصوتية بالواط المشعة بواسطة المصدر في الغرفة 1. $R_1 = [\overline{\alpha} S/(1-\overline{\alpha})]_1$ هو ثابت الغرفة بالقدم المربع للغرفة رقم 1. إذا وجد امتصاص هواء تستبدل $\overline{\alpha}$ بـ $\overline{\alpha}_T$ للمعادلة 10ـ53. تم افتراض درجة الحرارة والضغط الطبيعى، وتم إهمال الـ 0.5 ديسيبل للمعادلة 10ـ64 كما سوف تلغى في المعالجات لاحقا.

في الغرفة 1، تتناسب كثافة الطاقة المرتدة بالقرب من الجدار المشترك مع الرتبة $W(1-\overline{\alpha})_1$، لأن كثافة الطاقة المتناسبة مع $\overline{\alpha} W$ تكون مصاحبة لمجال الطاقة المباشرة (أنظر المعادلة 10ـ41). ترتبط القدرة الصوتية W_1 التى سوف ترسل خلال الجدار المشترك إذا كان الجدار تام الامتصاص ($\alpha_W = 1$) مع الطاقة المرتدة في الغرفة 1 مضروبة بالنسبة $S_W \alpha_W / S\overline{\alpha}_1$، بمعنى أن،

$$W_1 = W(1-\bar{\alpha})_1 \frac{S_W \cdot 1}{S\bar{\alpha}_1} = \frac{WS_W}{R_1} \qquad 10\text{-}76$$

يشير المدلول 1 إلى أن الكميات تخص الغرفة رقم 1.

القدرة W_2 المرسلة إلى الغرفة رقم 2 تساوى τW_1 (أنظر المعادلة 10ـ74)، لذلك،

$$W_2 = \frac{W\,S_W\,\tau}{R_1} \qquad 10\text{-}77$$ سلطان

بالتعبير عن W_2 كمستوى قدرة بالديسيبل يعطينا مستوى قدرة الصوت في الغرفة 2 بدلالة مستوى القدرة للمصدر الفعلى في الغرفة 1.

$$\mathrm{PWL}_2 = \mathrm{PWL} + 10\log_{10}\frac{S_W}{R_1} - \mathrm{TL} \quad \mathrm{db} \qquad 10\text{-}78$$

من المعادلة 10ـ75 نحصل على،

$$\mathrm{PWL}_2 = \mathrm{SPL}_1 + 10\log_{10}\frac{S_W}{4} - \mathrm{TL} \quad \mathrm{db} \qquad 10\text{-}79$$

بالتعويض بـ PWL_2 في المعادلة 10ـ73 يعطى مستوى ضغط الصوت في الغرفة 2.

$$\mathrm{SPL}_2 = \mathrm{SPL}_1 - \mathrm{TL} + 10\log_{10}\frac{S_W}{4} + 10\log_{10}\left(\frac{1}{S_W} + \frac{4}{R_2}\right) \quad \mathrm{db} \qquad 10\text{-}80\text{أ}$$ سلطان

بدلالة مستوى القدرة في الغرفة 1 (أنظر المعادلة 10ـ75)،

$$\mathrm{SPL}_2 = \mathrm{PWL}_1 - \mathrm{TL} + 10\log_{10}\left(\frac{S_W}{R_1}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{1}{S_W} + \frac{4}{R_2}\right) \qquad 10\text{-}80\text{ب}$$ سلطان

بالحل بالنسبة لفقد الإرسال من المعادلة 10ـ80أ نحصل على،

$$\mathrm{TL} = \mathrm{SPL}_1 - \mathrm{SPL}_2 + 10\log_{10}\left(\frac{1}{4} + \frac{S_W}{R_2}\right) \qquad 10\text{-}81$$ سلطان

تخفيض الضوضاء

يعرف تخفيض الضوضاء بالديسيبل على النحو،

$$\text{NR} \equiv \text{SPL}_1 - \text{SPL}_2 \qquad \text{db}$$ سلطان10-82

حينئذ، يكون تخفيض الضوضاء المزود بواسطة جدار بين غرفتين على الصورة،

$$\text{NR} = \text{TL} \ \text{-}10\log_{10}\left(\frac{1}{4} + \frac{S_W}{R_2}\right) \quad \text{db}$$ سلطان10-83

حيث NR الفرق في مستويات ضغط الصوت على جانبى الجدار معين بواسطة قياس مستوى ضغوط الصوت على الجانب الابتدائي بواسطة ميكروفون يتحرك هنا وهناك في مجال الصوت المرتد وحينئذ يطرح منه مستوى ضغط الصوت بواسطة ميكروفون يتحرك حول المنطقة القريبة بحق من السطح على الجانب الثانوى. TL هو عشرة أمثال اللوغاريتم للأساس 10 للنسبة بين طاقة الصوت الساقطة على الجدار وطاقة الصوت المرسلة عبر الجدار. S_W مساحة الجدار المرسل بالمتر المربع أو بالقدم المربع، R_2 هو ثابت الغرفة 2 ويساوى $S\bar{\alpha}/(1-\bar{\alpha})$، حيث S المساحة الكلية لأسطح الغرفة على الجانب الثانوى و $\bar{\alpha}$ هو معامل الامتصاص المتوسط للغرفة 2. S يجب أن يكون لها نفس الأبعاد مثل S_W. إذا وجد امتصاص هواء يجب استبدال $\bar{\alpha}$ بـ $\bar{\alpha}_T$ للمعادلة 10-53.

تم تحقيق المعادلة 10-83 عمليا بواسطة العالم لندن للترددات بين 150 و2000 هيرتز، ماعدا للكمية الصغيرة المضافة.

يجب ملاحظة خصوصا أنه إذا كان الجانب الثانوى للوحة مفتوح إلى غرفة لها امتصاص قوى (R_2 كبيرة) أو إذا كانت مفتوحة على الخارج، فإن تخفيض الضوضاء يساوى،

$$\text{NR} = \text{TL} + 6\,\text{db}$$ سلطان10-84

كنقطة أخيرة، إذا تحرك أحدهم إلى المجال – البعيد للجدار المشع، والذي يكون بالتقريب خلف مسافة تبعد عرض جدار واحد، فإن مجال الصوت سوف يبدأ في الانخفاض مع المسافة وفي النهاية، عند مسافة كبيرة كافية من الجدار، تصبح المعادلة 10-80 على الصورة،

$$\text{SPL}_2 = \text{SPL}_1 - \text{TL} + 10\log_{10}\frac{S_W}{R_2}$$ 10-85

تجد هذه الحالة، على سبيل المثال، لنافذة في أحد جدران غرفة. بالقرب من النافذة، تنطبق المعادلة 10ـ81، وبعيد عن النافذة بشكل كافى، فإن المعادلة 10ـ85 سوف تنطبق.

16-10 فقد الإرسال المقاس والمحسوب

فقد الإرسال المتوسط

المكتب العالمى للقياس ومعامل ريفرينك في جينيف هما المختبرات "الرسمية" المعترف بها في الولايات المتحدة لقياس فقد الإرسال في الجدران. بشكل عام، تقيس هذه المختبرات عند الترددات 125، 250، 500، 1000، 2000، وعند 4000 هيرتز. يتعين الإرسال المتوسط بأخذ المتوسط الحسابى البسيط لفقودات الإرسال عند الترددات 125، 250، 500، 1000، وعند 2000 هيرتز.

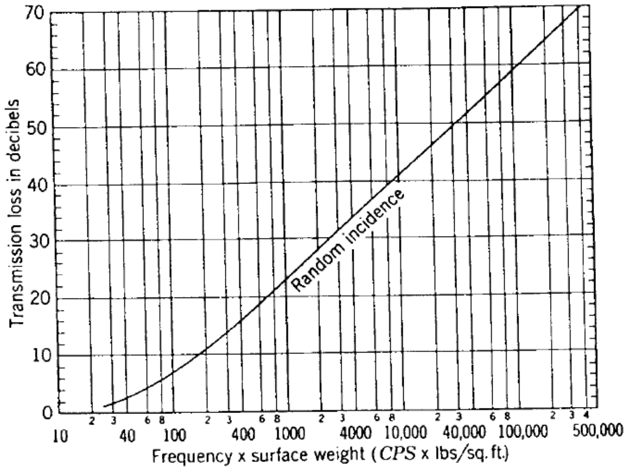
في إنجلترا، تؤخذ القياسات بشكل رسمى بواسطة مختبر الفيزياء الدولى، فيما عدا أن فقد الإرسال المتوسط يتعين من البيانات عند 200، 300، 500، 700، 1000، 1600، و2000 هيرتز. بشكل عام لا تختلف فقودات الإرسال المتوسط كثيرا بين البلدين.

الجدران المنفردة

يكون فقد الإرسال للجدران المنفردة، التي تكون متجانسة في البناء وتكون رطبة (مثبطة بحيث أنها لا تدوي عند طرقها بمطرقة، غير معتمد بالدرجة الأولى على حاصل ضرب الكثافة السطحية (باوند لكل قدم مربع) في التردد. يكون السمك غير مهم بشكل عام للجدران الأقل من 12 بوصة ماعدا بقدر ما يزيد الكثافة السطحية. يبين الشكل 10ـ26 منحنى فقد – الإرسال، للصوت الذي يسقط عشوائى على الجانب الابتدائي (مقاس بالشكل التجريبى المبين في الشكل 10ـ25). يبين المنحنى أنه، بالنسبة للجدران المنفردة المثبطة، يزداد فقد الإرسال حوالي 5 ديسيبل لكل مضاعفة للتردد أو لكل مضاعفة للوزن على القدم المربع. في الجدول 10ـ3، نبين كثافات السطح لجدار ذى سمك بوصة واحدة مصنوع من المواد المدونة. للجدار ذى سمك 2ـ بوصة، تتضاعف كثافة السطح، وهكذا.

الجدران المتعددة

عندما يجب أن يتجاوز فقد الإرسال المتوسط 40 ديسيبل، فإنه بشكل اقتصادي يتم استخدام جدران مزدوجة. عموما، يكون فقد الإرسال المتوسط خلالها 5 إلى 10 ديسيبل أكبر لوزن المادة المعطى من قيمته عند استخدام حائط منفرد مصنوع من نفس المواد. يبين الشكل 10ـ27 فقد الإرسال المتوسط لكل من الجدران المنفردة والمزدوجة التى لها البناءات المتخلفة المبينة.



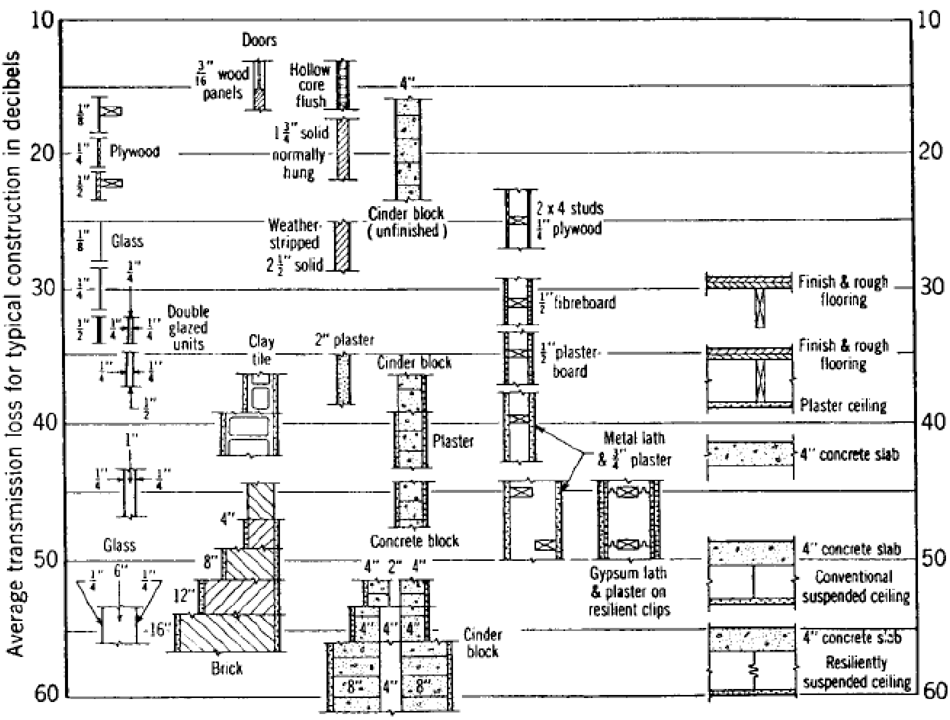
الشكل 10ـ26 فقد الإرسال (TL) لحواجز صلبة مثبطة. يمكن تعيين فقد الإرسال المتوسط من هذا المنحنى بافتراض التردد 500 هيرتز. بالنسبة للجدران غير المثبطة اطرح 5 ديسيبل من فقد الإرسال المتوسط. في حالة موجات الصوت المستوية الساقطة عموديا على سطح اللوحة، يزداد فقد الإرسال 6 ديسيبل لكل مضاعفة لقيمة المحور الأفقى بدلا من 5 ديسيبل كما هو مبين هنا للصوت الساقط العشوائى.

الجدول 10ـ3 أوزان مواد البناء الشائعة.

المادة	كثافة السطح رطل/قدم^2
طوب	12-10
خرسانة نفاية	8
خرسانة كثيفة	12
خشب	4 – 2
الزجاج الشائع	14.5 – 12.5
الرصاص	65
الألومونيوم	14
الصلب	40
الجبس	5

على سبيل المثال، فقد الإرسال المتوسط لجدار قوالب النفاية المزدوج، سمك كل ورقة 4 بوصة،

مفصولة بـ 4 بوصة، وكلتا الورقتين مجصصة (مطلية) من الخارج، يكون حوالي 55 ديسيبل. يعطى قالب – النفاية المنفرد، سمك 4 – بوصة ومجصص من كلا الجانبين، فقد إرسال حوالي 42 ديسيبل. إذا تم زيادة سمك الجدار المنفرد إلى 8 بوصة، فإنه من المتوقع أن يزداد فقد الإرسال حوالي 5 ديسيبل، كما وجدنا في الفصول السابقة. لذلك، فإن الجدار المزدوج يكون 8 ديسيبل أفضل م الجدار المنفرد الذي له نفس الوزن الكلى.



الشكل 27.10 فقودات الإرسال المتوسط (TL) لبناءات متنوعة مبنية كما هى مبينة بالشكل. عند وضع هذا المخطط، كان مفترض أنه لا توجد ممرات تطويق. بمعنى أخر، يصل كل الصوت في غرفة الاستقبال خلال اللوحة وليس عن طريق ممرات بديلة.

مشكلة مشاركة الجدران المزدوجة في إنشاء المبانى خارج نطاق هذا الكتاب. للمزيد من المعلومات حول التفاصيل المعمارية نوجه نظر القارئ إلى كتاب كلوم [16]. تم عمل أبحاث مكثفة في إنجلترا [17] وهولندا [18] على بناء الشقق وبيوت الصف لعزلة الضوضاء بشكل أفضل. تتوفر هذه الدراسات في شكل تقارير فنية تنشر من وقت لآخر.

18-10 الأوعية

عند تجميع جدران منفردة أو مزدوجة لعمل وعاء، فإن كمية التخفيض في الضوضاء تعتمد على فقودات الإرسال المجمعة. في الحقيقة، الفتحات الصغيرة، الشقوق حول، أو النوافذ الرقيقة قد تبطل جزء كبير من فعالية الوعاء الجيد في العادة.

دعنا نتخيل الحالة حيث يكون الوعاء بالكامل موضوع في مجال ضوضاء منتظم. لتعيين فقد الإرسال بالتعويض في المعادلة 10ـ83 أو المعادلة 10ـ85 للحصول على تخفيض الضوضاء الكلى للوعاء، يجب جمع مساحات ومعاملات الإرسال لكل الجدران، الأبواب، والنوافذ المأخوذة في الاعتبار في المعادلة

$$\mathrm{TL} = 10\log_{10}\frac{S}{S_1\tau_1 + S_2\tau_2 + S_3\tau_3 + \ldots..}\ \mathrm{db} \qquad 10\text{-}86$$

حيث S المساحة الكلية لكل أسطح الوعاء إما بالمتر المربع أو القدم المربع، S_1، S_2، S_3، .. مساحات أسطح الغرفة المختلفة بنفس الوحدات مثل S. τ_1، τ_2، τ_3، .. هى معاملات إرسال هذه الأسطح، على الترتيب، وتوجد باستخدام العلاقة،

$$\tau_n = \frac{1}{\mathrm{antilog}_{10}(\mathrm{TL}_n/10)} \qquad 10\text{-}87$$ سلطان

حيث τ_n معامل الإرسال للسطح المعين، TL_n فقد الإرسال المنشور للسطح المعين.

المثال 6ـ10

كمثال نموذجى، عين فقد الإرسال المتوسط لجدار قالب نفاية 4 – بوصة سمك فيه نافذه زجاجية سمكها 1\8 بوصة. إذا كانت المساحات هى 200 و20 قدم مربع على الترتيب.

الحل

من الشكل 10ـ27 نرى أنه بالنسبة للزجاج $\mathrm{TL}_1 = 26$ db ولقالب النفاية 4 – بوصة فإن $\mathrm{TL}_2 = 46$ db،

$$\tau_1 = (\mathrm{anti}\log_{10} 26/10)^{-1} = (4\times10^2)^{-1} = 2.5\times10^{-3}$$

$$\tau_2 = (\mathrm{anti}\log_{10} 46/10)^{-1} = (4\times10^4)^{-1} = 2.5\times10^{-5}$$

بالتالى،

$$\tau_{\text{avg}} = \frac{S_1\tau_1 + S_2\tau_2}{S} = \frac{0.05+0.005}{200} = 2.75\times10^{-4}$$

من الواضح أن الإرسال خلال النافذة ($S_1\tau_1$) يكون أكبر بكثير منه خلال المتبقى من الجدار الكبير ($S_2\tau_2$). يكون فقد الإرسال للمجموعة على الصورة،

$$\text{TL} = 10\log_{10}\frac{1}{\tau_{avg}..} = 10\log_{10} 3.64\times10^{3} = 35.6\ \text{db}$$

بالرجوع إلى الشكل 10ـ27 يتضح أنه إذا تم استخدام نوافذ مزدوجة الطلاء، مثلا بواسطة ألواح زجاج 1\4 بوصة منفصلة بمسافة 1 بوصة، فإن فقد الإرسال للبناء ككل سوف يساوى تلك في حالة قالب النفاية، بمعنى 46 ديسيبل، بدلا من 10 ديسيبل أقل، كما كان في حالة المثال المعطى هنا.

المثال 10ـ7

محرك طائرة يتم اختباره في خلية على جانبها توجد غرفة سيطرة. الجدار الذي يفصل غرفة السيطرة عن خلية الفحص عبارة عن جدار خرسانى مصبوب سمكه 12 – بوصة له الأبعاد 40 في 20 قدم. في هذا الجدار يوجد نافذة مزدوجة مصنوعة من لوحين زجاج نصف بوصة منفصلين بمسافة 6 بوصة بالهواء ولهما أبعاد 10 في 3 قدم. عين مستوى ضغط الصوت عند 500 هيرتز في غرفة السيطرة بالقرب من النافذة، بفرض أن ثابت الغرفة R كبير جدا وأن مستوى ضغط الصوت في خلية الفحص يكون 140 ديسيبل.

الحل

فقد الإرسال للجدار يوجد من الجدول 10ـ1 والشكل 10ـ26 عند 500 هيرتز يكون

TL (concrete)= 56 db

فقد الإرسال للنافذة يوجد من الشكل 10ـ27،

TL (concrete)= 59 db

عند مقدمة النافذه، فإن تخفيض الضوضاء يوجد من المعادلة 10ـ83.

$$NR = 59 + 10\log_{10} 4 = 65 \text{ db}$$

مستوى ضغط الصوت يساوي

$$SPL_2 = 140 - 65 = 75 \text{ db}$$

على أحد جوانب النافذة، يكون مستوى ضغط الصوت هو

$$SPL_2 = 140 - 56 = 78 \text{ db}$$

سلطان

مراجع هذا الباب

1- يمكن العثور على تعريف الموجات الموقوفة والثابتة في (American Standards Acoustical Technology, Z24.1-1951, American Standards Association, Inc., New York N.Y)

2- P.M. Morse, "Vibration and Sound," 2nd ed., Chap. VIII, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1948.

3- P.M. Morse and R.H. Bolt, Sound Waves in Rooms, Rev. Mod. Phys. 16: 69-150 (1944).

4- F.V. Hunt, L.L. Beranek, and D.Y. Maa, Analysis of Sound Decay in Rectangular Rooms, *J. Soc. Amer*., 11: 80-94 (1939).

5- L.L. Beranek, Acoustic Measurements," pp.329-336, John Wiley & Sons, Inc., New York 1949.

6- V.O0 Knudsen, Architectural Acoustic," pp. 132-141, , John Wiley & Sons, Inc., New York, 1932.

7- "Sound Absorption Coefficients of Architectural Acoustical Materials, " *Acoust. Materials Assoc. Bull*. 14, 1953, New York, N.Y.

8- "Sound Absorption Coefficients of the More Common Acoustical Materials," *Natl. Bur. Standards Bull., Letter Circ*. LC870.

9- تكون هذه المقولة صحيحة تحديدا عندما يكون عرض وارتفاع النافذة يساوى عدة أطوال موجية أو أكثر. عندما تكون أبعاد النافذه تقارب أو أقل من الطول الموجى، فإن معامل الامتصاص سوف يبدو أكبر أو أصغر من 1.0 بسبب تأثيرات التشتت.

10- L.L. Beranek, Acoustic Measurements," pp.860-869, John Wiley & Sons, Inc., New York 1949

11- W.C. Sabine, " Collected Papers on Acoustics," pp. 43-45, Harvard

University Press Cambridge, Mass., 1927 (out of print)

12- R.F. Horris, " A Derivation of the Reverberation Formula, " published in Appendix II of V.O. Knudsen, " Architectural Acoustics," John Wiley & Sons, Inc. New York, 1932.

13- V.O. Knudsen and C.M. Horris , "Acoustical Designing in Architectural ," John Wiley & Sons, Inc. New York, 1950.

14- A. London, Methods for Determining Sound Transmission Loss in the field. *J. Research Natl. Bur. Standards*, 26: 419-453 (1941).

15- L.L. Beranek, Acoustic Measurements," chap. 19, pp.870-884, John Wiley & Sons, Inc., New York 1949

16- D. J. W. Cullum, " The practical application of Acoustic Principles," pp. 53-61, Spon, Ltd., London, 1949.

17- Building Research Station, Watford, Herts., England.

18- Research Institute for Public Heath, Engineering TNO, the Hague, Holland.

الباب الحادى عشر
السيطرة على الضوضاء
NOISE CONTROL

الجزء السادس والعشرون – الإجراءات والمصادر

1.10 مقدمة

يصبح الضوضاء بسرعة مشكلة وطنية رئيسية. يعيش الناس في مجموعات أكثر تركيزا، وترتفع تكلفة السكن بحيث أصبحت إنشاءات المبانى أخف وأخف في الوزن. بسبب غياب المواصفات لمستويات الضوضاء المحتملة، قوانين البناء في العديد من الدول سمحت للبناة الذى يعتمدون على التخمين لبناء شقق وبيوت صفية بجدران ناقصة صوتيا وطوابق رنانة.

كانت الضوضاء من الطرق السريعة ومن المطارات بمثابة النكبة التى دمرت العديد من المناطق السكنية التي تعتبر ممتلكات لمدننا. كانت مشكلة ضوضاء المطارات الرادع الرئيسي للطيران الخاص الواسع الانتشار لأن شكاوى الجيران المتعلقة بالضوضاء جعلت من الضروري تحديد أماكن حقول الطائرات في مناطق نائية نسبيا.

لدينا في المصنع والمكتب مشاكل خطيرة أيضا. طرق المعادن، مكائن التثبيت، القواطع، المطاحن، مصانع العلب ومكائن النسيج هى فقط بضعة أمثلة لمصادر الضوضاء التي قد تؤثر على السمع بشكل دائم وتتداخل مع اتصال الخطاب (الحديث).

يجب حماية المسافرين داخل الطائرة من الضوضاء الحادة للمراوح والعوادم. يتحقق هذا جزئيا بتبطين هيكل الطائرة بالمواد الصوتية. في السنوات القريبة، أصبحت الطائرات النفاثة أحد أسوء مصادر الضوضاء لنا. يجب فحص المحركات نفسها في خلايا اختبار تكون مطلية بما فيه الكفاية لتوفير الهدوء وعدم إزعاج الجيران. عند التسخين، عندما لا تكون الطائرة النفاثة في التحليق، يجب أن توضع خلف كواتم الصوت المخصصة في مواقف الطائرات الموجودة في المطارات. حتى الآن، ليس هناك حل لمشكلة الضوضاء الخارجية المنبعثة أثناء الطيران.

تحتاج كل هذه المشاكل الى اهتمام مهندسى الصوتيات. الغرض من هذا الباب هو تقديم الإجراءات التى بواسطتها أن يحاول شخص ما لحل المشاكل النموذجية للضوضاء وأن يقدم بيانات الأداء لبعض التركيبات الصوتية الشائعة المستخدمة في السيطرة على الضوضاء.

إن مشكلة تخفيض الضوضاء تأخذ معناها الصحيح وسياقها بحضور الناس كمستمعون. تم تطوير التصميم الصوتى لفضاءات المصانع، المكاتب، والمناطق السكنية. ستقدم بعض هذه المعايير في الباب 13، والذي يتعلق بالظاهرة النفسصوتية. في هذا الباب، نحن سنحصر أنفسنا في الجانب الفيزيائى للمشكلة، مع ترك الكمية الضرورية لتخفيض الضوضاء في مشكلة معينة كشيء سيتقرر بعد أن يختار المعيار النفسصوتى.

2.11 إجراءات سيطرة – الضوضاء

عوامل في سيطرة الضوضاء

القاعدة الأولى لسيطرة الضوضاء هى تصميم أو تعديل بناء الآلة أو الجهاز ليكون أقل ضوضاء. احيانا يمكن عمل هذا بتلك الخطوات مثل استبدال التروس بدافع الحزام- V، باستعمال حاملات الاهتزاز تحت الأقدام لكيلا يرسل الاهتزاز إلى التراكيب الأخرى التي بدورها ستشع كصوت، بإستبدال ماكينة من طراز معين بماكينة أخرى، باستعمال القطع بالقشط القاسى بدلا من القطع بالقشط المسنن، وهلم جرا.

النظرة الأخرى لتخفيض الضوضاء هو تقليل دليل التوجيهية في الاتجاه الذي يقع فيه المستمع. يمكن أحيانا إنجاز هذا عن طريق تدوير المصدر حتى يشير محوره الرئيسى للإشعاع إلى نقط أخرى. في أحد الأمثلة، تم تعديل أجزاء التهوية في صالة عرض بحيث تشع الضوضاء نحو المشغل بدلا من الجوانب حيث يجلس الجمهور.

المنهج الأخر المتبقى هو أن تزيد المسافة بين المصدر والمستمعين. على سبيل المثال، لا يجب بناء المستشفيات بالقرب من المطارات، الطرق السريعة، والسكك الحديدية. إذا البقعة كبيرة، يجب تحديد مكان البناية عليها بعيدا عن الشارع المزدحم كلما أمكن.

بالرغم من استعمال كل إجراء معروف لتعديل التصميم الأساسي للجهاز، إلا أن الأداة قد لا تزال

صاخبة جدا في موقع معين. في تلك الحالة، يجب أن نلجأ إلى تقنية واحدة أو أكثر من التقنيات القياسية الثلاث لسيطرة الضوضاء، بمعنى، النقل إلى مكان أخر، التغطية، أو وضع الأداة في وعاء. لكي يطبق المهندس أي مند هذه التقنيات بشكل كمي، يجب أن نأخذ في الاعتبار العوامل التالية إذا كان مطلوب تحقيق حل مقنع للمشكلة:

1ـ يجب تعيين القدرة الصوتية المشعة بواسطة المصدر في كل من عدد مناطق (حزم) التردد الموصوفة. عادة، يتم عمل القياسات بطريقة من الطرق التالية:[1]

(أ) بواسطة محلل أوكتاف ـ حزمة له 8 حزم تردد: من 37.5 إلى 75، 75 إلى 150، 150 إلى 300، 300 إلى600، 600 إلى 1200، 1200 إلى 2400، 2400 إلى 4800، و4800 إلى 10000 هيرتز.

(ب) بواسطة محلل ثلث أوكتاف – حزمة له 25 حزمة تردد: 20إلى 45، 45 إلى 57، 57 إلى 71، 71 إلى 90، 90 إلى 114، 114 إلى 142، 142 إلى 180، 180 إلى 228، 228 إلى284، 284 إلى360، 360 إلى456، 456 إلى568، 568 إلى720، 720 إلى912، 912 إلى1136، 1136 إلى1440، 1440 إلى1824، 1824 إلى2272، 2275 إلى 2880، 2880 إلى3648، 3648 إلى 4544، 4544 إلى 5760، 5760 إلى 7296، 7296 إلى 9088، و9088 إلى 11520 هيرتز.

(ج) بواسطة محلل حزمة – رفيعة مع عرض حزمة بين 2 و50 هيرتز، أو

(د) بواسطة محلل حزمة – رفيعة مع عرض حزمة يساوى 2 إلى 20 في المائة من عرض الحزمة المتوسط.

تختزل أحيانا النتائج التى يتم الحصول عليها بأحد هذه الأنواع من المحللات، إلى ما سوف يكون إذا تم الحصول عليها بواسطة محلل له عرض حزمة تساوى 1 – هيرتز. إذا كان رسم البيانات بدلالة مستوى القدرة بالديسيبل كدالة في التردد لحزمة 1 – هيرتز، نقول أن الرسم يعطى مستوى طيف القدرة. تستخدم أيضا عروض حزم أخرى في تمثيل البيانات.[1]

2ـ يجب قياس سمات التوجيهية للمصدر التى تعطى الكميات النسبية للقدرة المشعة في الاتجاهات المختلفة حول المصدر عند ترددات مختلفة.

3- يجب دراسة مسار الإرسال أو البيئة التى تربط مصدر الضوضاء مع آذان المستمعين. هذه البيئة ربما تكون فضاء الغرفة او المصنع، وهي الحالة التى تكون معادلات مجالات الصوت في الغرف الكبيرة غير المنتظمة المقدم في الباب السابق صالحة. تعطى هذه المعادلات ضغط الصوت كدالة في القدرة الصوتية، المسافة من المصدر، وسمات الغرفة. قد يكون طريق الإرسال في العراء، حيث ينقص ضغط الصوت بشكل خطي مع المسافة، ماعدا التأثيرات الإضافية للهواء وامتصاص التضاريس الأرضية وميول درجة الحرارة. أو قد يتضمن مسار الإرسال بناءات (تركيبات) متخللة مثل كواتم الصوت، القنوات، الجدران، والتلال. يجب أخذ هذه في الاعتبار سواء كانت قريبة من المصدر أو قريبة من المستمع، أو من كليهما.

4- يجب اختيار المعايير القابلة للتطبيق في المشكلة الموجودة. على سبيل المثال، إذا كام من المقرر بأن يكونوا العمال الموجودون بالقرب من مصنع ما قادرون على التحدث معا وأن الجيران البعيدين يجب ألا يكونوا منزعجون من الضوضاء، فإنه يجب تخفيض مستويات الصوت إلى تحت المستويات المبينة بالمنحنى الملائم في الجزء الثانى والثلاثين الذي يعبر عن أقصى مستويات ضغط الصوت التى تسمح بإنجاز هذه الأهداف. تلك المنحنيات تكون المعايير للتصميم.

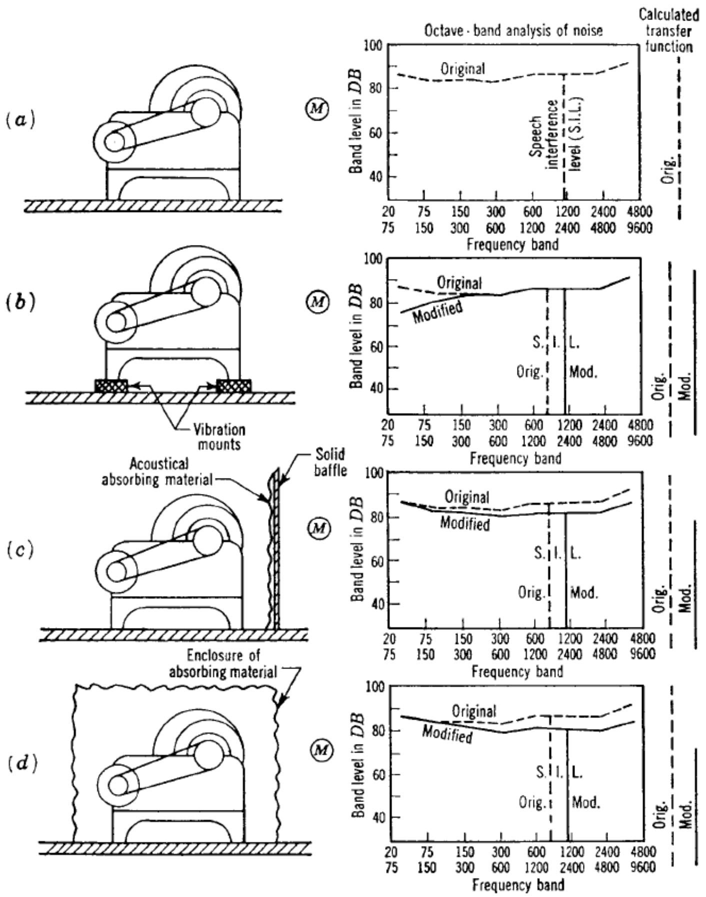
5- التحكم في كمية تخفيض الضوضاء المطلوبة. يتحقق هذا باعتبار كل العوامل السابقة. إن مستوى القدرة (بالديسيبل) زائد دليل التوجيهية ناقص تأثيرات البيئة والبناءات المتخللة يعطى مستويات ضغط الصوت نتيجة المصدر عند مكان المستمع. الفرق بين مستويات ضغط الصوت عند مكان المستمع والمنحنى المعيارى المناسب يكون عبارة عن كمية تخفيض الضوضاء (بالديسيبل) الواجب تحقيقه.

عزل الاهتزاز

بالرغم من أن هذا النص مكرس كليا في الجانب الصوتى لتخفيض الضوضاء، إلا أن أهمية والحاجة لعزل الاهتزاز لا يجب أن تهمل. العديد من الأوقات يمكن تسكيت الآلة بشكل كافي عن طريق تركيبها على عازلات مطاطية لكيلا تثير اهتزازاتها التراكيب المحيطة والتي ستشع ضوضاء بالتبعية. تم الإشارة إلى المراجع الحديثة في الاهتزاز في المراجع 2 و3.

إيضاح سيطرة الضوضاء

للمساعدة في الحصول على الشعور بالقيمة النسبية للعدد من أنواع سيطرة ـ الضوضاء، دعنا نشير إلى الشكل 1ـ11. يبين هذا الشكل ماكينة افتراضية لتوليد – ضوضاء. عندما تثبت الماكينة على مباشرة أرضية غير ـ متصلبة، فإنها تولد طيف الضوضاء المبين بجانب المخطط الأول (a). يقاس طيف الضوضاء في 8 حزم تردد أوكتاف عند المكان المؤشر بالرمز M على المخطط الأول.



الجزء (أ)

الشكل 1ـ11 أمثلة افتراضية لتخفيض الضوضاء تبين القيم النسبية لحاملات الاهتزاز، العوائق، الأوعية، والمواد الصوتية المستخدمة في المجموعات المختلفة. تم عرض مستوى تداخل – الخطاب (أنظر الجزء الثاني والثلاثين) بالقضيب الرأسي المؤشر. تم بيان SIL دالة النقل (الصخب) المحسوبة قبل وبعد التعديل بالشريط المبين في الرسم على اليمين.

مخطط القضيب (الرسم البيانى) على اليمين يعطى دالة النقل المحسوبة متولدة بواسطة الماكينة. دالة النقل هى كمية مستخدمة للمساعدة في تعيين مستوى صخب المقدار الذاتى للضوضاء المركبة، عندما يكون طيف ضوضائه معروفا. حتى وقت قريب، كان يعتقد أن دالة النقل تتناسب مع صخب الصوت، بمعنى آخر، إذا تم الحكم بأن صخب الصوت أعلى مرتين فإن دالة النقل ستضاعف. هو المفهوم مفتوح الأن للتساؤل. يتم مناقشة دالة النقل في الجزء الثلاثين. يتم بيان مستوى تداخل – الخطاب ارتفاع القضيب في الحزمة 1200 – 2400 هيرتز. يتم مناقشة هذا المفهوم في الجزء الثاني والثلاثين. إن فاعلية سيطرة الصوت في يتعلق البشر لا تتم بواسطة التغيرات في الطيف في الثانية، لكن بشكل خاص بواسطة تلك التغيرات مثل دالة النقل ومستوى تداخل – الخطاب.

في الشكل (b) نبين تأثير وضع اهتزاز ناعم يتصاعد تحت الماكنة. تناقص طيف الضوضاء، خاصة عند الترددات الأدنى. في هذا المثال، يكون عزل الاهتزاز من القيمة لكن لا يكون كافية في ذاته.

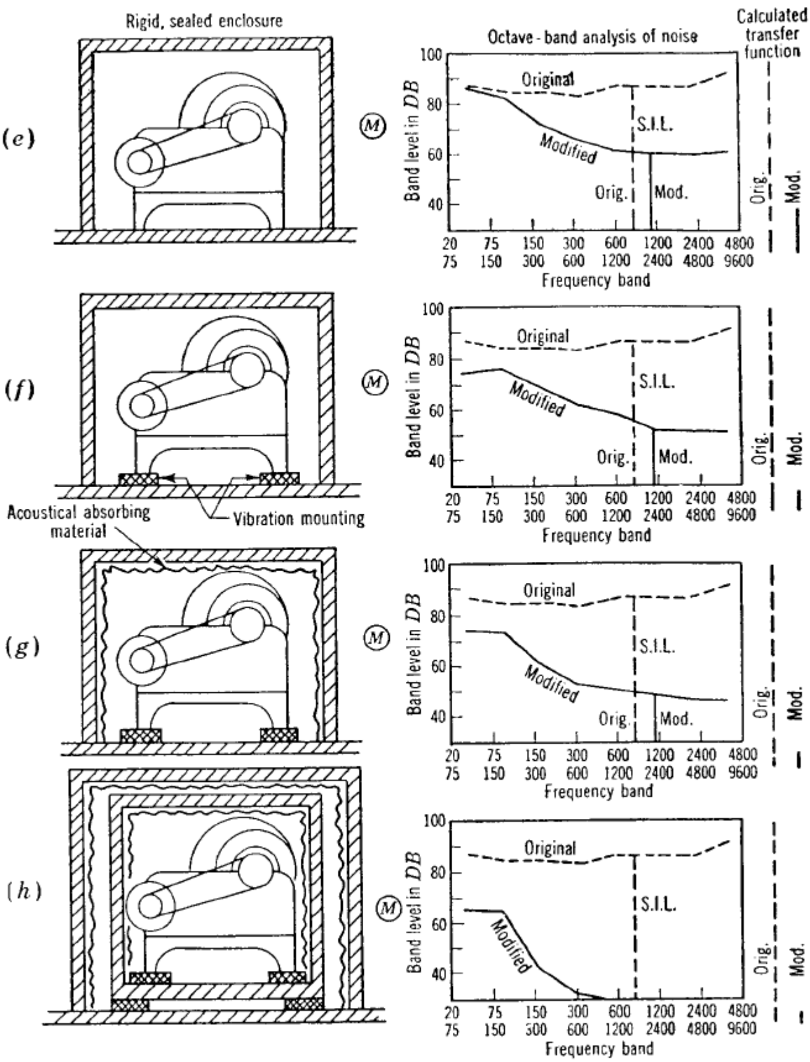
في الجزء (c) نبين الفائدة الصغيرة التى تنتج من نصب الحائط القصير بجانب الماكنة.

في الجزء (d) أن فائدة طفيفة فقط تكتسب عند وضع الماكينة في وعاء مبطن بمادة صوتية مسامية. مثل هذه البطانات تكون فعالة في التحكم في مرات الترداد وثوابت الغرفة لكن لا تصنع في العادة عوائق صوتية جيدة.

في الجزء (e) نبين تأثير تعبئة الماكينة المعزولة – الاهتزاز في صندوق محكم – الهواء. تتناقص مستويات الضوضاء بكمية كبيرة، خاصة عند الترددات الأعلى.

في الجزء (f) نبين أن الجمع بين عزل الاهتزاز وصندوق الهواء المحكم ينتج تخفيض كبير في طيف الضوضاء، دالة النقل، ومستوى تداخل – الخطاب.

في الشكل (g) نرى تأثير تعبئة الماكينة في صندوق محكم الهواء المكسى ببطانة ممتصة صوتية. هنا، يتضح ان سيطرة الضوضاء تكون جيدة جيدا.



الجزء (ب)

بقية الشكل 11ـ1 أمثلة افتراضية لتخفيض الضوضاء تبين القيم النسبية لحاملات الاهتزاز، العوائق، الأوعية، والمواد الصوتية المستخدمة في المجموعات المختلفة. تم عرض مستوى تداخل – الخطاب (أنظر الجزء الثانى والثلاثين) بالقضيب الرأسى المؤشر. تم بيان SIL دالة النقل (الصخب) المحسوبة قبل وبعد التعديل بالقضيب المبين على الرسم على اليمين.

في الجز (h) نرى تأثير الوعاء المزدوج مع حاملات اهتزاز مزدوجة ومكسية ببطانة صوتية ممتصه. تكون مستويات الضوضاء في هذه الحالة منخفضة جدا. إن الصعوبة الواضحة لحل الشكل 11ـ1 هى استحالة وجود فتحات تهوية أو لهروب غازات الاحتراق. لتحقيق هذه الحاجات يجب استعمال

قنوات أو حاجبات صوتية. تخفيضات أيَ مقدار تقريبى معقول يكون ممكنا بالاختيار الصحيح لتصميم الحجاب.

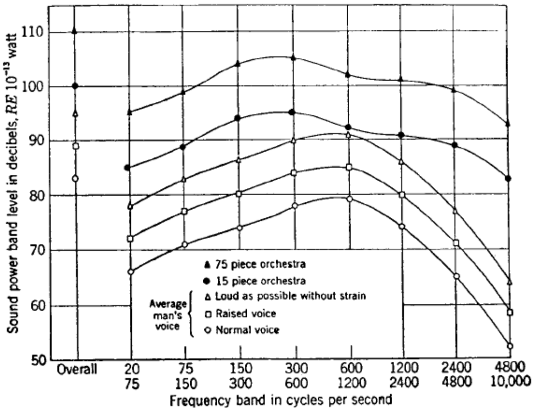
3.11 مستويات القدرة للمصادر

إن منحنى مستوى القدرة كدالة في التردد للمصدر هى نقطة البداية في تصميم سيطرة – الضوضاء. تشع معظم المصادر كمية ثابتة من القدرة الصوتية بغض النظر عن أن المصدر موجود في غرفة أو في الهواء الطلق. على سبيل المثال، مروحة التهوية المستخدمة في أنظمة مكيفات – الهواء تظهر أنها تشع نفس القدرة الصوتية تقريبا، وسواء كان مرتبط بقناة أم لا، وبغض النظر عن مدى الضغوط الخلفية التى تصادف عادة. هذا يحدث لأن، حتى عندما يكون المصدر في غرفة، فإن معاوقة إشعاعه تكون تقريبا مثل معاوقة الفضاء الحر. رأينا من دراستنا للشكل 10ـ21 أن مجال الصوت بالقرب من الماكينة يكون في الغرفة تقريبا مثله في الخلاء، إلا إذا كان ثابت الغرفة صغير جدا.

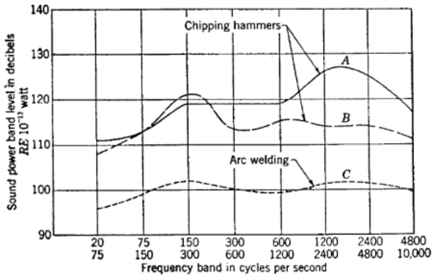
بالطبع، توجد حالات، حيث يتفاعل الوعاء الصغير مع المصدر بشكل قوى لدرجة أنه يعدل طاقته المشعة. عادة يجب معالجة مثل هذه الحالات بالتحليل الرياضى الدقيق. سوف نقسم المصادر الصوتية إلى مجموعات عامة عديدة من أجل التحليل. تقع هذه المجموعات في ثلاثة فئات عريضة كما هو مبين في الجدول 11ـ1. تكون مستويات القدرة، سواء كان مقاس أو مقدر من البيانات المتاحة، لبضع مصادر مدونة في الجدول 11ـ1، كما هو مبين في الأشكال 11ـ2 إلى 11ـ11. تعبر هذه المنحنيات عن مستوى القدرة في كل حزمة من حزم التردد الثمانية، حيث يعرف مستوى القدرة بالعلاقة،

$$\text{PWL} = 10\log_{10}\frac{W}{10^{-13}} \quad \text{db} \qquad 11\text{-}1$$

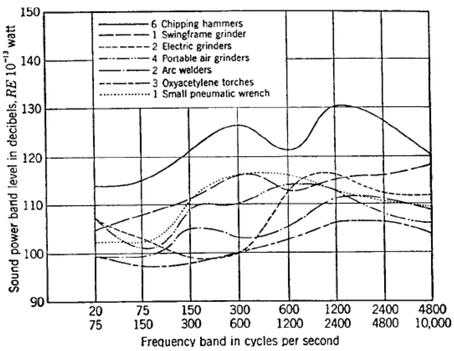
في العادة نصف PWL في المصطلح "مستوى القدرة" مع مرجع (re) مقداره watt 10^{-13}.



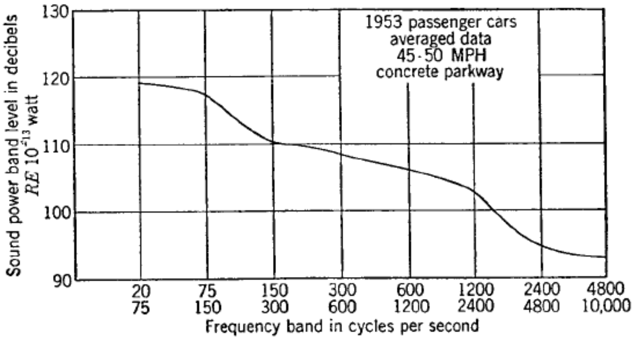
الشكل 2.11 مستويات قدرة الصوت المتوسطة على زمن ـ طويل منسوبة إلى 10^{-13} watt مبينة لمتوسط أصوات ذكرية لأوركسترا من 15 و75 فرد. بالنسبة للصوت البشرى، سوف تكون القمم كما تقرأ على التدريج C لمقياس مستوى – صوت في حدود 15 ديسيبل أعلى من إجمالى – كل المستويات المبينة هنا. بالنسبة للأوركسترا سوف تكون القمم أعلى بحوالى 15 ديسيبل.



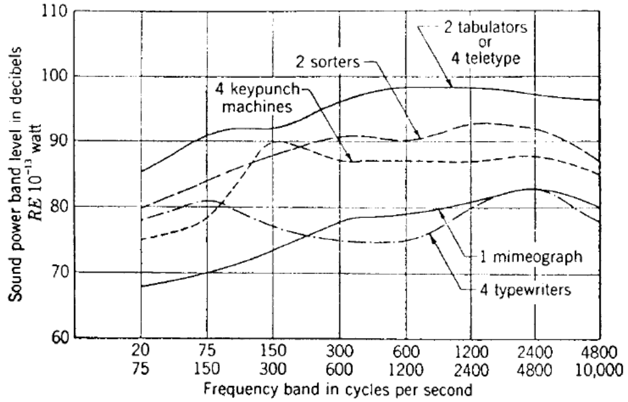
الشكل 3.11 مستويات قدرة الصوت كما تقرأ على تدريج مقياس بطيء لمحلل حزمة – أوكتاف لمطارق تقطيع من أصناف مختلفة تعمل بضغط هواء $90 lb/in^2$. (A) مطرقة تعمل على لوح صلب سميك 18 في 18 بوصة، (B) مطرقة تعمل في هواء وسطى، و(C) نفسه للحام قوس بتيار 300 أمبير.



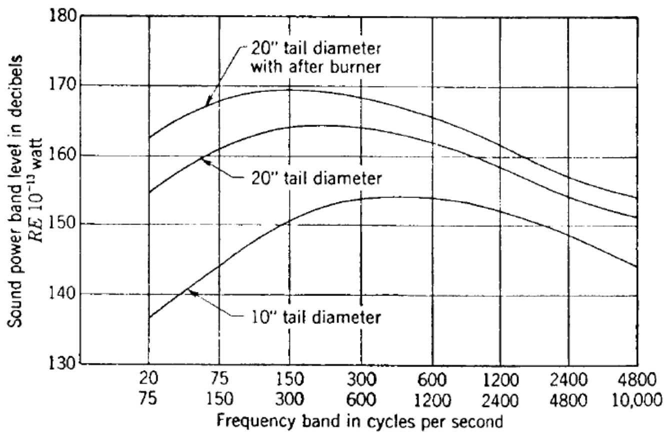
الشكل 4.11 مستويات قدرة الصوت على تدريج مقياس بطيء لمحلل حزمة – أوكتاف لعدد من الأدوات الصناعية.



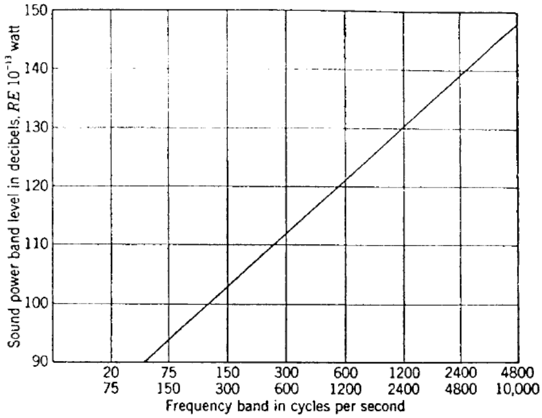
الشكل 11ـ5 مستويات قدرة الصوت المتوسطة لسيارات ركاب لعام 1953 تسافر بسرعة بين 40 و50 ميل/الساعة على طريق سريع أسفلت نموذجي. تمت القياسات خارجيا.



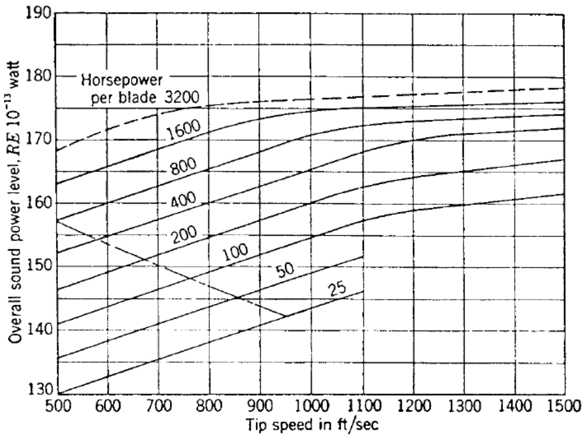
الشكل 11ـ6 ضوضاء مكائن مكتب. تم اخذ البيانات في مكتب كبير، وتم افتراض ظروف غرفة انتشار. تم قراءة البيانات على مقياس متوسط كـ 3 ديسيبل أسفل قمم متكررة. كل مكائن المكتب كانت عتيقة وقبل عام 1950.



الشكل 11ـ7 مستويات قدرة صوت متولدة بمحركات نفاثة (بدون مراوح) لثلاثة قدرات لطائرة.



الشكل 11-8 مستويات قدرة صوت متولدة بواسطة خرطوم بخار 4\3 بوصة مستخدم في تنظيف آلة لفرم اللحم.

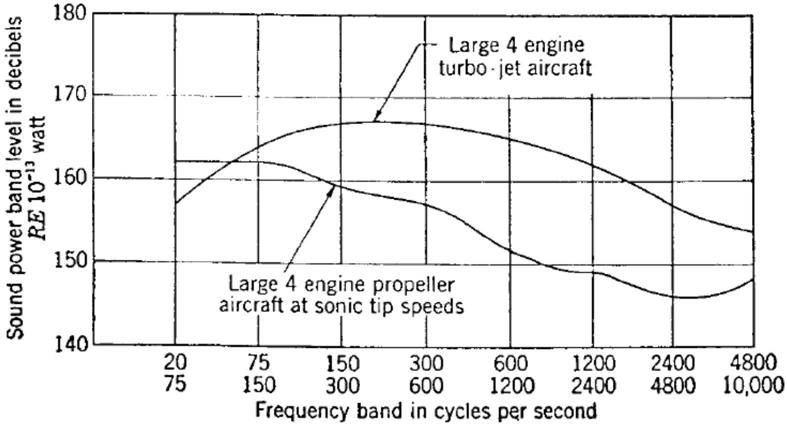


الشكل 11-9 **مستويات قدرة صوت الإجمالية المتولدة في الطيران بواسطة مراوح عام 1952 كدالة في سرعة الرأس وحصان قدرة لكل نصل.**

11-4 نماذج التوجيهية للمصادر

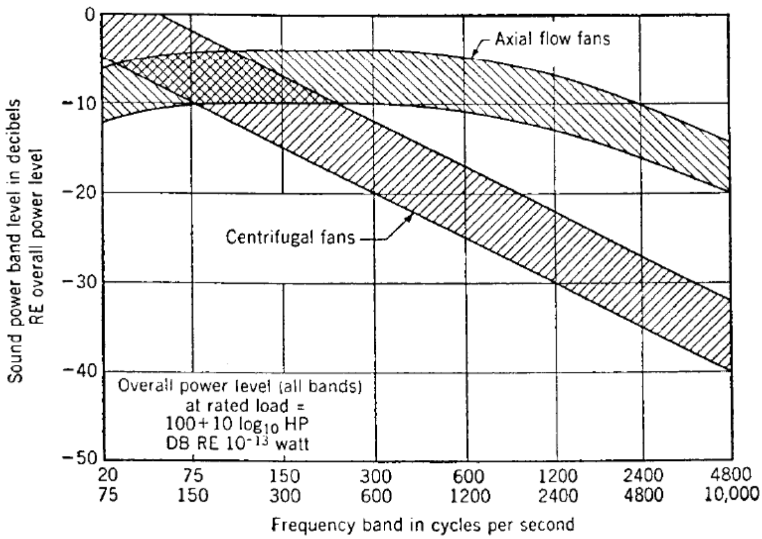
نموذج التوجيهية لمصدر الصوت هو وصف، عادة يتم تمثيلة بيانيا، لمستويات الشدة عند مسافة معينة من مركز المصدر كدالة في الزاوية θ حول المصدر في مستوى معين يمر خلال مركز المصدر. عرف دليل التوجيهية في الجزء الحادى عشر بأنه النسبة، بوحدات الديسيبل، بين الشدة عند نقطة على محور معين للمصدر إلى الشدة التى سوف توجد عند نفس النقطة عندما يشع مصدر غير موجه نفس القدر الصوتية. تكون نقط القياس لنماذج التوجيهية بعيد عن المصدر بشكل كافي بحيث يكونا في المجال – البعيد، بمعنى أن ضغط الصوت يتناقص خطيا مع

المسافة على امتداد المحور المعين.

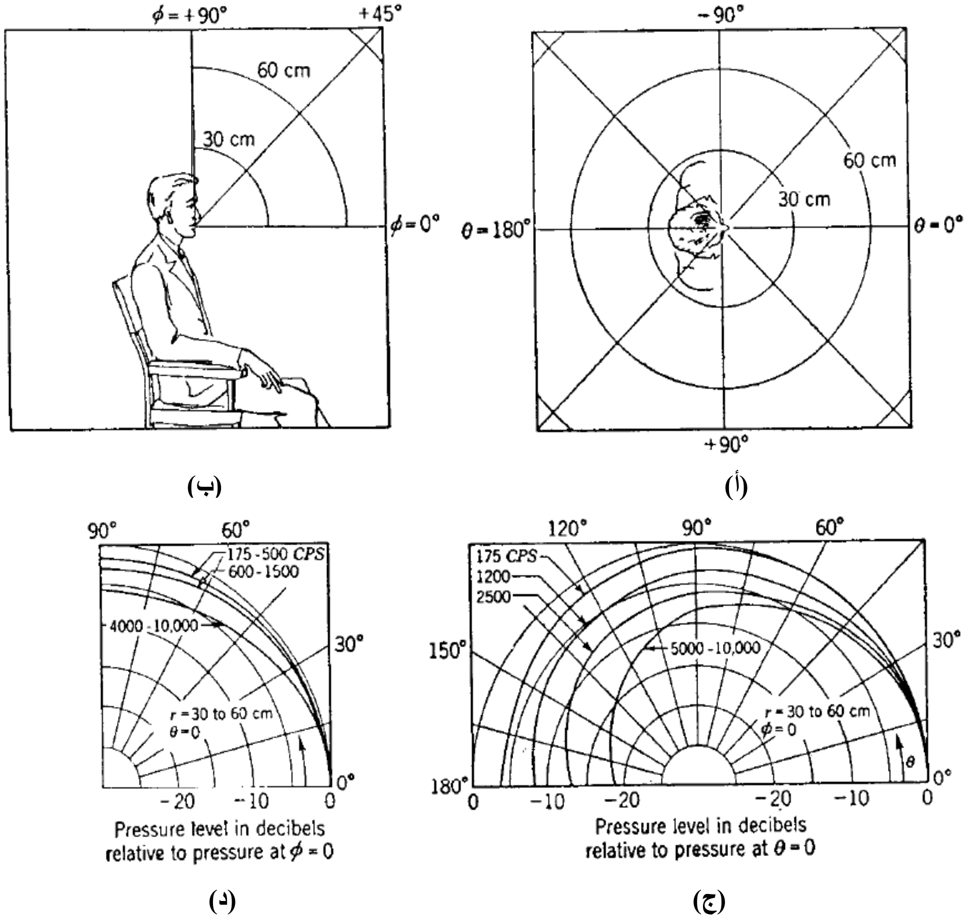


الشكل 11ـ10 مستويات حزمة قدرة الصوت لطائرة بأربعة – محركات عند سرعات انطلاق (فترة 1952)

في الأشكال 11ـ12 إلى 11ـ14 نبين نماذج توجيهية عند ترددات مختارة لبعض المصادر المدونة في الجدول 11ـ1. يمكن تعيين دليل التوجيهية لأي محور معين من نموذج التوجيهية بالطرق المقدمة في الجزء الحادى عشر.



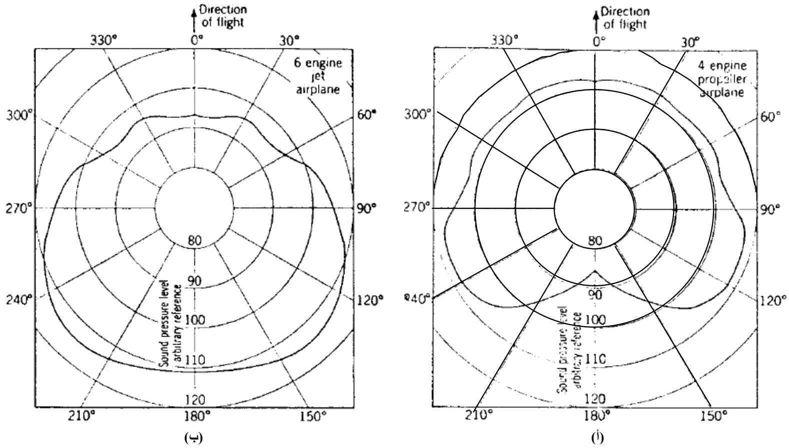
الشكل 11ـ11 مخطط بيانى لتعيين مستويات حزمة قدة الصوت لنوعين من مراوح التهوية. تم تعيين مستوى القدرة الإجمالية أولا من المعادلة المعطاة في الشكل، حيث HP هى قدرة المروحة بوحدات حصان القدرة عندما تعمل كما هو مقدر.



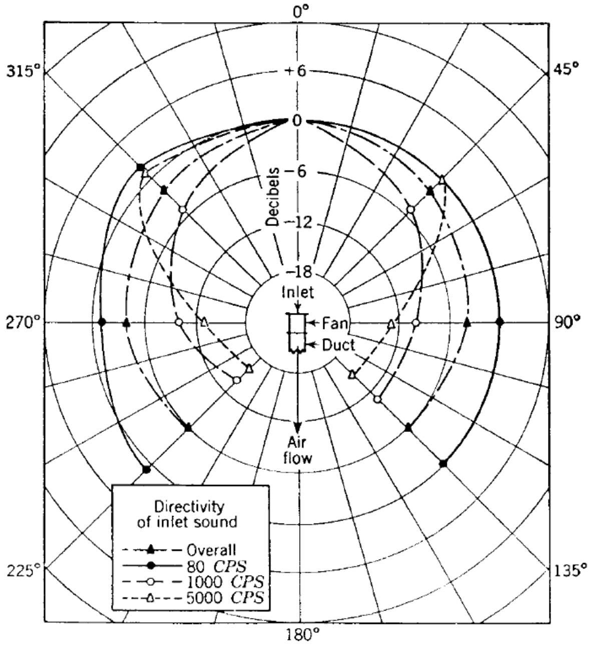
الشكل 12.11 نماذج التوجيهية لصوت بشري.[4] دلائل التوجيهية تكون 175 هيرتز = 1 ديسيبل، 1200 هيرتز = 31 ديسيبل،2500 هيرتز = 4.5 ديسيبل، و5000 إلى 10000 هيرتز = 4.5 ديسيبل.

الجدول 1.11 فئات مصادر الصوت (تم عرض البيانات في الأشكال 2.11 إلى 11.11)

	الفئة	أمثلة المصادر
A	مصادر الحديث والموسيقى:	الصوت البشرى، الأوركسترال
B	مصادر الدمج والاهتزاز:	مكائن المصنع، مكائن الانتقال، مكائن المكاتب
C	مصادر لها تدفق هوائي:	عادم المحرك النفاث، الطائرات الجوية، المروحيات، الطائرة أثناء التحليق، مراوح التهوية



الشكل 11ـ13 نماذج التوجيهية لطائرة منطلقة. (أ) طائرة مروحية، (ب) طائرة نفاثة.



الشكل 11ـ14 نماذج توجيهية لفتحة الدخول لمروحة تهوية من النوع المحورى مع علبة بقطر 16 بوصة.

الجزء السابع والعشرون – مسارات الإرسال الصوتى

يتواصل مصدر الصوت والمستمع بواسطة مسار إرسال صوتى. قد يكون هذا المسار خلال الهواء الطلق أو الهواء داخل الغرفة، أو كلاهما معا. على سبيل المثال، قد يبدأ الصوت الخلاء ويصل في النهاية إلى مقصورة المستمع داخل الغرفة. عند تناول الإثنين معا، في العادة يتم تفتيت المشكلة

بحيث يتم تناول كل جزء بشكل منفصل، مع تذكر الحقيقة الأساسية وهى أن كل الطاقة الصوتية المشعة من المصدر يجب أخذها في الاعتبار. سوف نعالج مشكلة الخلاء (الهواء الطلق) أولاً.

5.11 الهواء الطلق

علاقات خاصة

يرتبط ضغط الصوت بالديسيبل عند نقطة في الفضاء الحر (إشعاع كروى) مع القدرة المشعة ودليل التوجيهية بالعلاقة،

$$\text{SPL} = \text{PWL} + \text{DI} - 10\log_{10} S_g + 0.5 \ \text{db} \qquad 11\text{-}2$$

(تأتى المعادلة 11ـ2 مباشرة من المعادلة 10ـ66 مع $R = \infty$). PWL مستوى القدرة بالديسيبل مع مرجع $re\ 10^{-13}$ watt (أنظر المعادلة 11ـ1). $\text{DI} = 10\log_{10} Q$ دليل التوجيهية بالديسيبل للمحور المعين المطلوب تعيين مستوى ضغط الصوت عليه، Q معامل التوجيهية للمحور المعين، و $S_g = 4\pi r^2$ مساحة سطح الكرة بالقدم المربع التى لها نصف القطر r الذى عنده يتم تعيين مستوى ضغط الصوت.

عند كتابة المعادلة 11ـ2 أفترض أن درجة حرارة الغرفة هى 67^oF والضغط الجوى هو $0.67\,\text{m}(30\text{in.})\,\text{Hg}$. تضاف تصحيحات مستوى ضغط الصوت المعطاة بالمعادلة الموجودة في الشكل 10ـ19.

الإشعاع النصف ـ كروى

في الغالب، يوضع مصدر الصوت بالقرب من الأرض لكي تشع القدرة إلى "نصف الفضاء". في هذه الحالة، عند كل النقط، ستضاعف شدات الصوت، الأمر الذي يعنى أنها أعلى بـ 3 ديسيبل من تلك المعطاة بالمعادلة 11ـ2. تكون العلاقة في هذه الحالة هى،

$$\text{SPL} = \text{PWL} + \text{DI} - 10\log_{10} S_h + 0.5 \ \text{db} \qquad 11\text{-}3$$

سلطان

حيث $S_h = 4\pi r^2$ مساحة سطح نصف الكرة بالقدم المربع التى لها نصف القطر r الذى عنده يتم تعيين مستوى ضغط الصوت. في هذه الحالة، يتناقص مستوى ضغط الصوت 6 ديسيبل

لكل مضاعفة للمسافة.

فقد الهواء – نظريا

إذا كان تردد الصوت المشع أكبر من 1000 هيرتز، فإن فقد الطاقة الصوتية في الهواء قد تصبح كبيرة و يجب أن يؤخذ في الاعتبار. يكون الفقد معبر عنه بالديسيبل لكل متر أو قدم (أنظر المعادلة 10-40) على الصورة،

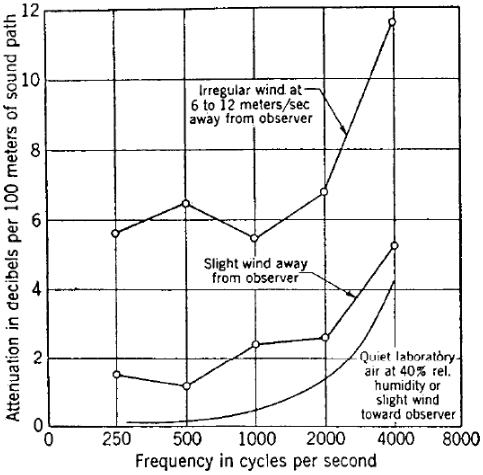
$$\Delta_m = 4.34(m_1 + m_2) \quad \text{db/m} \qquad 11\text{-}4$$

$$\Delta_m = 1.324(m_1 + m_2) \quad \text{db/ft} \qquad 11\text{-}5$$

حيث m_1 الفقد بالمتر$^{-1}$ نتيجة الزوجة وتوصيل الحرارة كما تعطى بالمعادلة 10-38، m_2 الفقد بالمتر$^{-1}$ نتيجة الامتصاص الجزيئى والانتشار وتعطى بالمعادلة 10-17.

فقد الهواء المقاس [5]

في الهواء الطلق، يكون اضمحلال الصوت أكبر بكثير منه داخل الغرفة، حتى في الأيام التى يكون الهواء فيها "ساكن". يحدث الاضمحلال الأكبر بواسطة الحركات الهوائية – الموجودة من قبل وتدرجات درجة حرارة الموضعية وحركة الدوران. في الشكل 11-15 نرى مجموعة من المنحنيات لاضمحلال هواء الخلاء (الطلق).



الشكل 11-15 الأهمية النسبية للريح في زيادة اضمحلال الصوت مقاسا في ظروف معملية.

[5]

المنحنى السفلى في الشكل يعطى الاضمحلال كما هو محسوب في هواء تحت ظروف معملية عند 40٪ رطوبة نسبية. المنحنيين المتبقيين في الشكل يبينان قيم الاضمحلال المقاس فعليا في تجارب خلاء مع وجود ريح تهب من المشاهد نحو المصدر. تم طرح تأثيرات التفرق الكروى والرطوبة (المنحنى السفلى). يمثل الفرق بين المنحنيين العلويين الاضمحلال نتيجة تقلبات (دوامات) الريح ويرى أنها في الحدود من 4 إلى 6 ديسيبل لكل 100 متر. تم الحصول على هذه النتائج بقياس مستوى ضغط الصوت عند مسافات مختلفة من مصدر الصوت الموضوع في برج ارتفاعه 12 متر (39 قدم). عندما تهب الريح من المصدر نحو المشاهد، فإن الاضمحلال يكون كما بالمنحنى السفلى. (من انجراد [5]).

فقد تضاريس الأرض

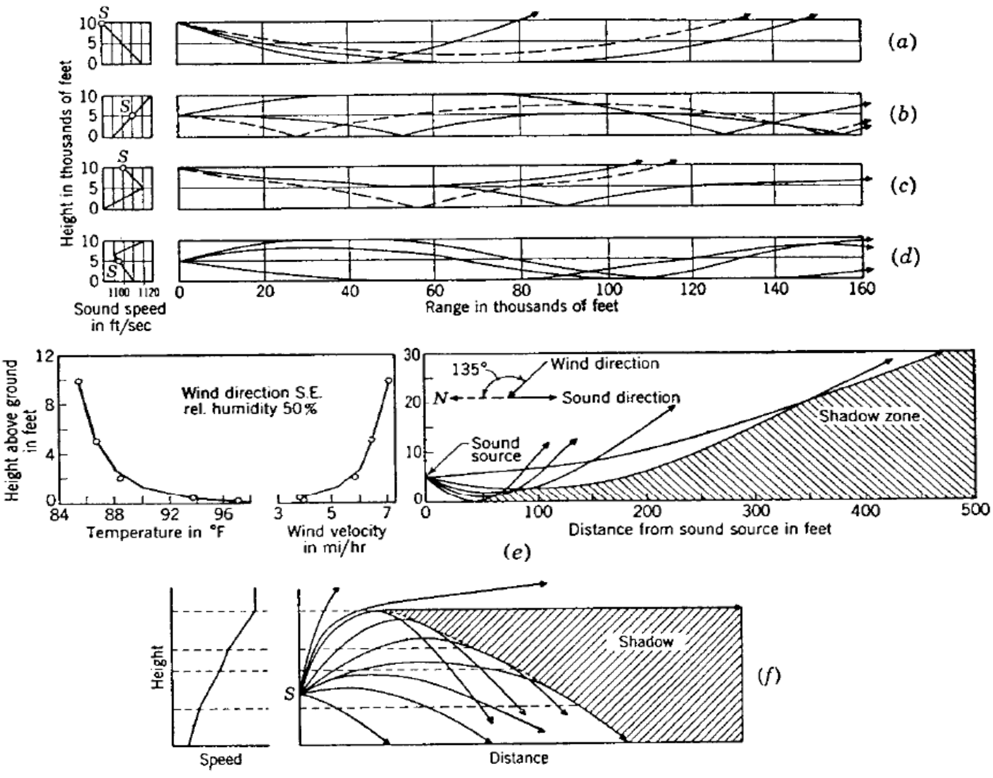
بالإضافة إلى امتصاص الهواء نفسه، يضمحل الصوت أيضا في السفر على التضاريس. تكون المناطق المشجرة أكثر فعالية في اضمحلال الصوت من أيَ مناطق معشوشبة. أيضا تساعد التلال في تبعثر الطاقة الصوتية. لسوء الحظ، تتغير الحالات العملية بالشكل الذي لا يمكن معه مناقشة هذه المشكلة هنا.

تدرجات درجة الحرارة

تولد تدرجات درجة الحرارة تأثيرات ملحوظة في انتشار الصوت، بالرغم من أن الريح تؤثر في انتشار الصوت بشكل أكبر. ميل درجة الحرارة الموجب مع الارتفاع عن سطح الأرض يولد انكسار الموجات الصوتية لأسفل، بالتالى، ينتج تحسن في مستوياتها. التأثير العكسى سوف يلاحظ في أيام الصيف الساخنة عندما يسخن سطح الأرض إلى درجة حرارة أعلى بكثير من درجة حرارة الهواء الذي يعلوها بعشرة أقدام أو أكثر. في هذه الحالة، قد يبدو أن الصوت يختفي بالكامل عند مسافة 100 قدم فقط.

يبين الشكل 16ـ11 ستة أمثلة للتشتت المتسبب بتدرجات درجة الحرارة. في (a) و(e) يكون تدرج الحرارة سالب، ويكون الصوت مسموع لمسافة محدودة ثم ينحنى إلى أعلى. في الأشكال (b) و(f) يكون التدرج موجب، وجزء كبير من الطاقة المشعة نحو الأعلى يعود إلى الأرض. من

الواضح أنه في الحالة الأخيرة سوف لا يتناقص ضغط الصوت بقدر المعدل الطبيعي 6 ديسيبل لكل مضاعفة للمسافة. في الحالات (c) و(d) تم افتراض انقلابات في درجة الحرارة تحدث عند 5000 قدم تقريبا. الصوت عند الأرض في هذه الحالات ينكسر بشكل يشبه انكسار الموجات الراديوية في الطبقة المنتظمة التأين (Kennelly - Heaviside) للغاز المؤين في الغلاف الجوى الأعلى. لاحظ أنه حيث تكون سرعة الصوت الأدنى، تكون كثافة الهواء الأعلى لذلك يولد انقلاب درجة الحرارة تأثير طبقة من الهواء الكثيف.



الشكل 16.11 منحنيات تبين تأثيرات تدرجات سرعة – الصوت (نتيجة تغيرات درجة الحرارة والضغط الجوى كدالة في المسافة من المصدر. (a) تدرج سرعة – صوت سالب منتظم، الطائرة عند 10000 قدم، (b)) تدرج سرعة – صوت موجب منتظم، الطائرة على ارتفاع 5000 قدم، (c) انقلاب حرارى، الطائرة على ارتفاع 10000 قدم، (d) انقلاب حرارى من النوع المخالف، الطائرة على ارتفاع 5000 قدم، (e) تدرج حرارى سالب والمصدر على بعد 5 قدم، و(f) تدرج حرارى موجب والمصدر على مسافة 5 قدم.

بالنسبة للحالات المعروضة في الشكل 16.11، لا يتناقص الصوت طبقا للعلاقات البسيطة للمعادلات 2.11 و3.11. في مسائل تخفيض – الضوضاء، يجب أن يؤخذ في الاعتبار تأثيرات

التدرجات الحرارية، لأن معالجة تخفيض – الضوضاء التى تكون مقبولة معظم الأيام والليالى، في مناسبات معينة، قد لا تكون مرضية بسبب فشل صلاحية قانون مقلوب – المسافة.

الموانع (الحواجز) Mufflers

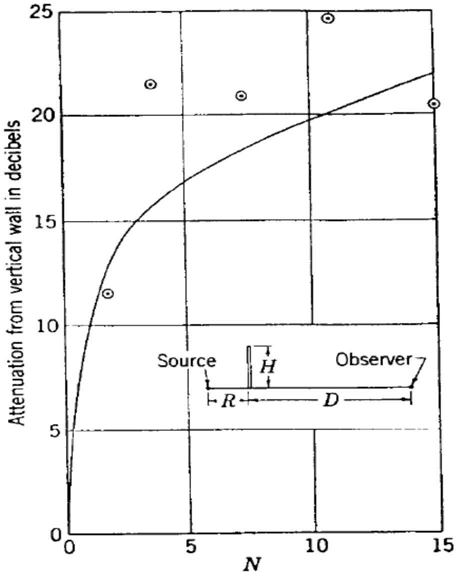
في مرات كثيرة يتم طرح السؤال، إذا تم بناء جدار بين مصدر الضوضاء ومنزلى، هل ستنخفض الضوضاء بشكل ملحوظ؟ إن الإجابة على هذا السؤال لا تكون بسيطة. إنها تعتمد على ارتفاع الجدار، الطول الموجى للصوت، بعد المصدر والمستمع عن الجدار، وعلى ارتفاع ات كل من المصدر والمستمع عن سطح الأرض. ما لم يكن كل من المصدر والمستمع عند مستوى سطح الأرض، وما لم يكن مصدر الضوضاء قريب بدرجة معقولة من الجدار بحيث لا نحتاج أن يكون ارتفاع ه كبير، فإن المانع من هذا النوع لا يكون عملي من وجهة النظر الاقتصادية.

الحل المبسط لهذه المشكلة، يكون بافتراض أن المصدر والميكروفون يكونا بالقرب من الأرض، كما هو مبين في الشكل 11ـ17.[6] يعطى المحور الأفقى في هذا الشكل بالعلاقة،

$$N = \frac{2}{\lambda}\left[R\left(\sqrt{1+\frac{H^2}{R^2}}-1\right)+D\left(\sqrt{1+\frac{H^2}{D^2}}-1\right)\right] \qquad 11\text{-}6$$

$$\approx \frac{H^2}{\lambda R} \qquad \text{if} \quad D >> R \geq H$$

حيث H ارتفاع المانع فوق خط النظر بين المصدر والمشاهد، R المسافة الأفقية من المشاهد إلى المانع، و D المسافة الأفقية من المصدر إلى المانع. تم رسم البيانات المقاسة في هذا الشكل للمقارنة. من الواضح أن الاضمحلالان تكون محدودة عمليا بحوالى من 15 إلى 20 ديسيبل.



الشكل 11ـ17 الاضمحلال نتيجة حائط منصوب لارتفاع H **فوق خط البصر بين مصدر الصوت والمشاهد.**[6] **تمثل الدوائر البيانات المقاسات عند** $H = 30$ ft ، $R = 20$ ft ، $D = 100$ ft ، $N \approx 40/\lambda$. **خلف** $N = 15$ ، **فإن** A **لم تكن أبدا أكبر من 20 ديسيبل وتهبط إلى 12 ديسيبل عند 3500 هيرتز.**

6.11 جدران التطويق Enclosing walls

الإجراء الشائع جدا للسيطرة على الضوضاء هو أن يطوق مصدر الضوضاء بالكامل. إذا تم ذلك، فإن الاعتبارات المبينة في الشكل 11ـ1 تنطبق بشكل أساسي. أولا، يجب ختم (لصق) الوعاء بشكل محمك السد، ماعدا أماكن التهوية المخطط لها. ثانيا، يجب اختيار كتلة وتركيب الحيطان، النوافذ، والأبواب بشكل جيد جدا لكي يتحقق الاضمحلال المطلوب. ثالثا، يجب أن يكون مصدر الضوضاء معزول – الاهتزاز عن الأرضية وعن الحيطان وعن سقف الوعاء لكيلا يصل الصوت إلى الخارج بواسطة طريق الهيكل.

فقد الإرسال المتوسط

تم جدولة اضمحلال الجدران والنوافذ في الشكلين 10ـ26 و10ـ27. بينا في المعادلة 10ـ86 والمثال 10ـ6 كيفية تعيين معامل الإرسال المتوسط لكامل الوعاء.

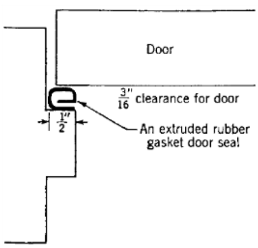
الأبواب

إن الأبواب تعتبر مشكلة مزعجة جدا بسبب صعوبة إنجاز الغلق الكافي حول الحافات وعند العتبات. الكثير من معلنى الأبواب القوميين الذين يدعون بأن أبوابهم تعطى اضمحلال يتراوح بين 35 إلى 45 ديسيبل في المتوسط، وجد أنها تعطى فقط 20 إلى 25 ديسيبل اضمحلال عندما تركب، وكان ذلك ببساطة نتيجة قلة اللصق والإحكام الصحيح.

المشكلة المبدئية مع الإحكامان هى أن كل الأبواب تقريبا تكون غير منتظمة بشكل كافي حتى يمكن ضغط بعض الأجزاء من مادة الختم (حشية لسد الفراغات لمنع الصوت) لسمك ثمن بوصة حتى تتصل مع الباب. بسبب المساحة الكبيرة المشمولة عند نقط الضغط وتصلب المطاط أو اللباد المستعمل، فإن القوة اللازمة لتوليد انضغاط كافي للمادة الحشو تكون كبيرة جدا. لهذا يكون من الصعب على الشخص غلق الباب. أيضا، يوضع إجهاد ثقيل على التجهيزات.

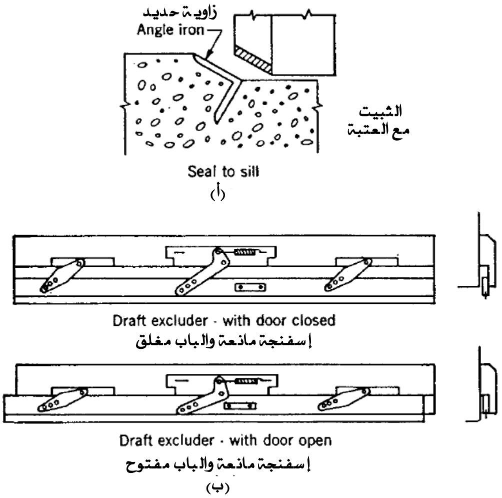
نوع بسيط ومقنع عموما، من انواع مادة الختم مبينة في الشكل 11ـ18. يغلق الباب ضد حشية مطاطية مشكلة، عريض من 0.5 إلى 1.0 بوصة. يمكن تدوير الحشية بشكل متصل حول الباب. العيب الرئيسى لهذه الحشية هو ضرورة وجود عتبة مرفوعة، مع الحاجة إلى عتبة منحدرة من جهة واحدة منها.

يبين الشكل 11ـ19أ وب ختمان محتملان عند العتبة. إن السفنجة المانعة هى الأداة التي تشغل بواسطة كباس غاطس على الحافة الداخلية للباب. عند غلق الباب، يدفع الختم إلى أسفل ضد الأرضية. هذا النوع من الأداة يمكن أن يستعمل بدون عتبة مرفوعة، بالرغم من أنه أقل فعالية بكثير من الترتيب المبين في الشكل 11ـ18.



الشكل 11ـ18 مثال لحشوة باب مصنوعة من حشية مطاطية مشكلة. تلف هذه الحشية حول الباب بالكامل حول الحواف الأربعة.

يجب أن يكون للباب لوحة وحيدة لها كتلة كافية لمنع إرسال الصوت، أو أن كل جانب يكون مغطى بمطاط مع فضاء هوائي بينهما يملئ بصوف معدني أو بطانة زجاجية.



الشكل 11ـ19 وسيلتان محتملتان لعمل السد والإحكام عند عتبة باب.[7]

11ـ7 كواتم الصوت والقنوات (Mufflers and ducts)

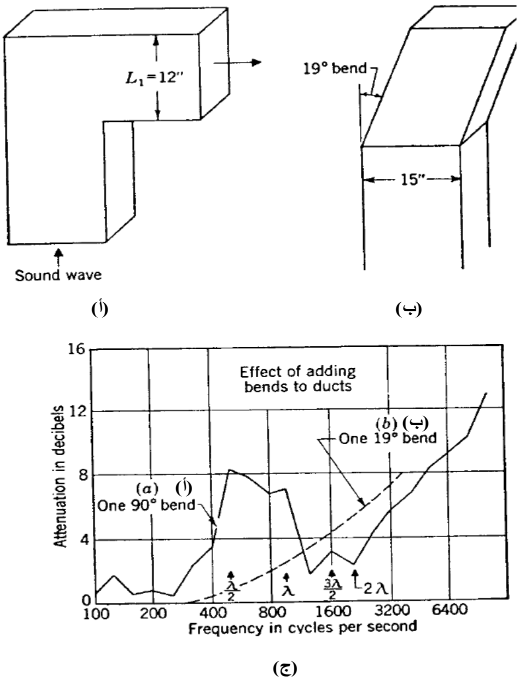
حينما يصاحب التدفق المستمر للهواء ضوضاء، فإنه من غير الممكن تشيد غرفة مغلقة جدا حول مصدر الضوضاء لتخفيض تأثيراتها المقلقة. عوضا عن ذلك، يتم استخدام كواتم للصوت أو أنابيب (قنوات) مخفضة للضوضاء. في الكاتم أو القناة يمكن أن يحدث اضمحلال للصوت بانعكاس الطاقة للخلف نحو المصدر أو بواسطة امتصاص الطاقة. يتحقق الانعكاس من خلال استخدام مرشحات أو قنوات بها انحناءات. يحدث الامتصاص في هياكل تبدد الطاقة في بطانات مسامية أو بلاطات أو عناصر اضمحلال الاهتزاز. تم مناقشة بضع أمثلة من كل نوع من عناصر لاضمحلال الضوضاء.

قنوات التهوية، الانحناءات

يمكن تخفيض الضوضاء المتولدة بمراوح التهوية بواسطة إدخال انحناءات في نظام القنوات. يبين الشكل 11ـ20 أداء انحناءات بزوايا 19^o إلى 90^o غير مكسوة. من الواضح أن الاضمحلال يكون كبيرا عند الرنين الأساسي للجدران الجانية للقناة (900 هيرتز)، عند $L_1 = \lambda / 2$ وعند

$L_1 = 3\lambda/2$ وعند ترددات عالية.

إذا كانت الانحناءات مكسوة بمادة صوتية لها معامل امتصاص يزيد عن 0.8، بإن الفقودات تعطى تقريبا بالمنحنيات المبينة في الشكل 11ـ21.



الشكل 11ـ20 اضمحلال الصوت بواسطة انحناءات غير مكسوة في قنوات تهوية. (a) اتجاهات انحناء 90^o غير مكسو، (b) اتجاهات انحناء 19^o غير مكسو، (c) بيانات مقاسة في a وb.

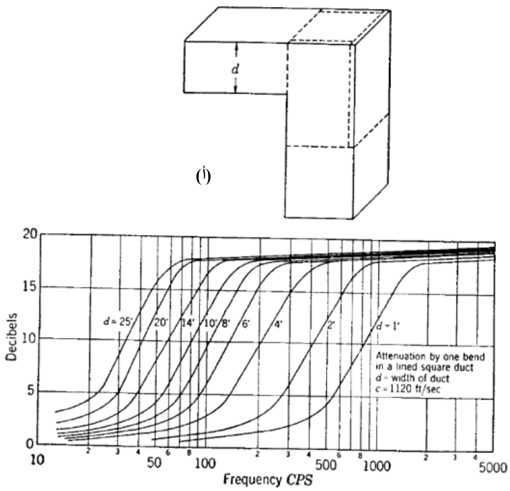
الكسوات

تستخدم الكسوات بشكل شائع لتخفيض الضوضاء الصادرة عن مراوح التهوية. يكون الأداء المقاس لأربعة قنوات لها الأبعاد الداخلية 8 في 11 بوصة وكل منها مكسوة بمادة مختلفة كما هو مبين بالشكل 11ـ22. البيانات معطاة بوحدات الديسيبل كدالة في التردد. في الشكل 11ـ23، توجد بيانات معروضة مثل البيانات أو ستة حجوم لقنوات مكسوة بلوح صوف – صخرى صلب من نوع Celotex، وسمك 1.0 بوصة. يكون المحور الرأسى في هذا الشكل بوحدات الديسيبل لكل قدم، لكن المحور الأفقى عبارة عن النسبة بين المحيط P ومساحة المقطع المفتوح A بالبوصة$^{-1}$. يعطى التردد كمتغير. من هذه البيانات، يستنتج أن العلاقة التقريبية لاضمحلال

الصوت تكون[8] على الصورة،

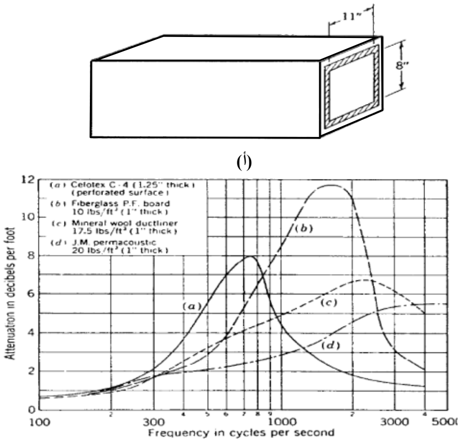
$$db/\ ft = \frac{12.6\ \overline{\alpha}^{1.4}\ P}{A} \qquad 11\text{-}7$$

حيث $\overline{\alpha}$ هو معامل الامتصاص المتوسط للمادة الصوتية التى تكسو هذه القناة، P المحيط الداخلى للقناة بالبوصة، A مساحة المقطع الداخلى للقناة بالبوصة المربعة.



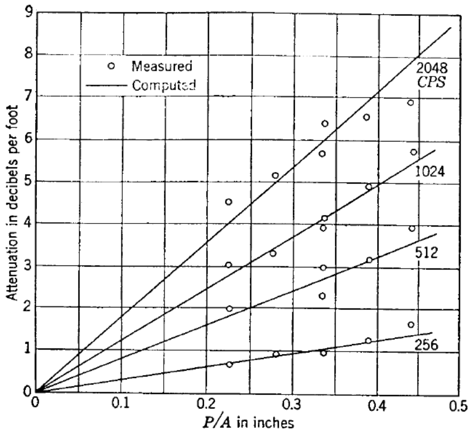
(ب)

الشكل 21.11 (أ) الأبعاد الفيزيائية لانحناء 90^{o} في قناة. (ب) المنحنيات التقريبية للاضمحلال المقدر عند الانحناء.



(ب)

الشكل 22.11 (أ) مخطط لقناة مكسوة، و(ب) الاضمحلالان المقاسة بالديسيبل لكل قدم للقناة في (أ) لأربعة مواد مختلفة.



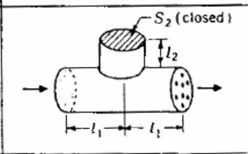
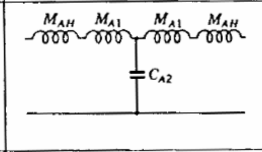
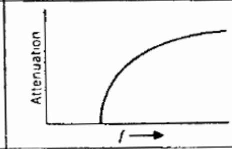
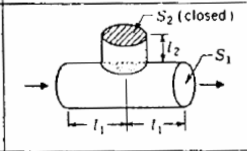
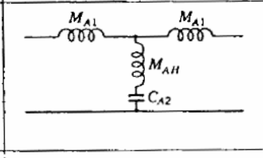
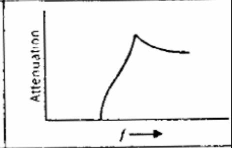
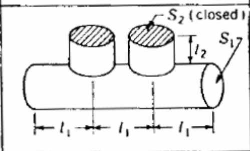
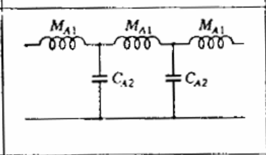
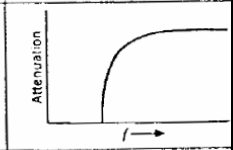
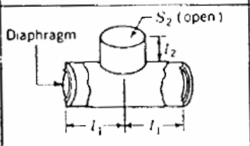
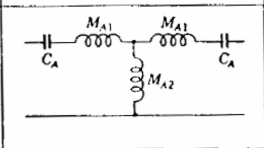
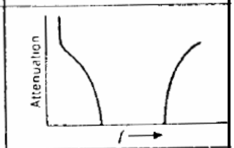
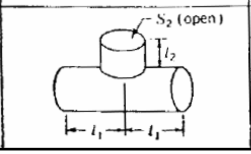
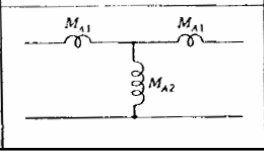
الشكل 11ـ23 الاضمحلال بالديسيبل لكل قدم لقنوات مبطنة من الجوانب الأربعة بمادة صوتية. تم حساب الخطوط المتصلة من المعادلة 11ـ7 كما تم قياس الدوائر بواسطة سابين [8].

المرشحات الصوتية

تستخدم المرشحات الصوتية في أنابيب العادم في كل سيارة وقطرة محرك – الديزل وعلى الكثير من الآلات الصناعية. إذا لم يكن للمرشح أى فتحات إلى الهواء الخارجى ماعدا فتحة الخرج الضرورية، فإنه من السهل جعله يمنع الصوت ذات التردد العالى.[9] الأكثر صعوبة بكثير هو عمل مرشح يمنع صوت التردد المنخفض عند مرور صوت تردد عالى. بشكل عام، يجب فصل الفضاء إلى جزئيين يستطيع لأحدهما أن يستنزف صوت التردد المنخفض إذا كان المطلوب تنفيذ مرشح تردد عالى، وإلا فإنه يجب استخدام سلسلة من الحجابات المانعة. من الواضح، إذا كان المطلوب مرشح يتدفق خلاله هواء بشكل متصل، فإن سلسلة الحجابات المانعة لا تكون عملية.

المعلومات الأساسية اللازمة لاختيار مكونات المرشحات الصوتية أعطيت في الباب 5 تحت عبوات المكونات الصوتية. في الجدول 11ـ2، تم تدوين سلسلة من هياكل المرشح وأيضا الدوائر المكافئة التقريبية والسمات النظرية للاضمحلال. تستند سمات الاضمحلال النظرية على افتراض أن المرشحات تنتهي عند كلتا نهايتيها في معاوقات الصورة لها. عمليا، سوف لا يكون هذا حقيقى، وأن الأداء المضبوط سوف تعتمد على طبيعة الإنهاء. أيضا، تم إهمال كل التبديد في الدوائر.

الجدول 11ـ2

Type	Filter	Analogous circuit	Attenuation characteristic
Low pass No. 1			
Low pass No. 2			
Low pass No. 3			
High pass No. 1			
High pass No. 2			

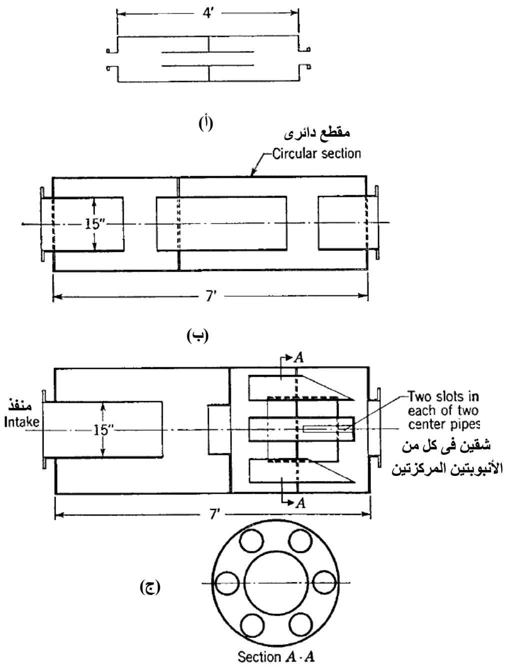
بالنسبة لمرشح التمرير-المنخفض رقم 1، الفتحات على أى نهاية تكون كتل صوتية، والنتوء الجانبى يكون متسعة صوتية. في تناظر المعاوقة يتم الحصول على الدائرة المكافئة المبينة. بالنسبة لمرشح التمرير – المنخفض رقم 2، الأنابيب على أى نهاية تعمل ككتلة صوتية. النتوء الجانبى يكون كتلة صوتية على التوالى مقدمة بواسطة الفتحات والمطاوعة الصوتية C_{A2}. في مرشح التمرير – المنخفض رقم 3، تم بيان النتوئين الجانبيين ومقاطع الأنابيب الثلاثة. هذه تولد إثنين من المطاوعات الصوتية على التوازى وثلاثة كتل صوتية على التوالى.

في حالة مرشحات التمرير-العالى، فرع التوازى يكون ببساطة عبارة عن أنبوبة إلى الهواء الطلق. إذا تم عمل l_1 قصر، فإن المرشحات سوف لا تقطع عند نهاية التردد – العالى حتى يكون التردد أكبر.

يبين الشكل 11ـ24 أمثلة لثلاثة مرشحات عملية، بينما يبين الشكل 11ـ25 الاضمحلالان

المقاسة. لاحظ أن الاضمحلالان المتوسطة للمرشح من هذا البناء تصبح كبيرة وتصل 25 ديسيبل عند الترددات الأعلى. المقاطع الأكثر يزيد اضمحلال التردد – العالى والحجم الأكبر سوف يخفض التردد الأدنى للاضمحلال العالى. ألواح ممتصة متوازية

الكثير من التطبيقات، مثل التكيف الذي يبرد الأبراج، وخلايا اختبار مروحة الطائرة، يتطلب حركة كميات كبيرة من الهواء عند السرعة العالية بواسطة الضغوط الخلفية. في هذه التطبيقات كثيرا ما يتم استخدام سلسلة من الحواجز (الصفائح) المتوازية المبينة في الشكل 11-26، حيث تم عرض حواجز متوازية لها سمك D تنفصل بمسافة S بين مركزيها.



الشكل 11-24 مخططات مقطعية لثلاثة مرشحات من النوع – غير المبدد. (أ) حجرتين بسيطتين متصلتين بأنبوبة. (ب) و(ج) مرشحات لمحركات ديزل كبيرة.

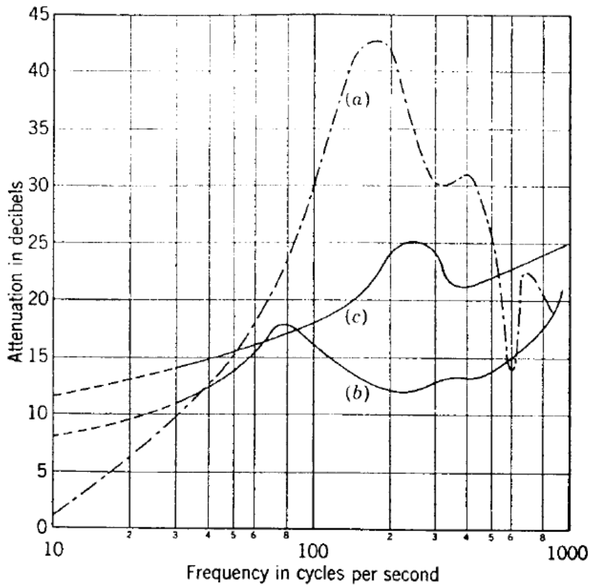
يبين الشكلين 11-27 و11-28 أداء هذه الحواجز التى لها سمك 4 و8 بوصات. تم إعطاء البيانات بدلالة الديسيبل لكل قدم طولى تم قياسها بواسطة ميكروفون متحرك خلال الهيكل (بمعنى، في صفحة الشكل 11-26) ورسم مستوى ضغط الصوت كدالة في المسافة. ميول هذا المنحنى تعطى الاضمحلال بالديسيبل لكل قدم.

يتعين مقدار الاضمحلال لهيكل (بناء) بطول معين بضرب الاضمحلال لكل قدم في الطول بالقدم. لكن، يكون من الصعب جدا تحقيق اضمحلالات عالية جدا (50 ديسيبل أو أكثر) لأن الصوت يمر بالمادة الممتصة بالسفر على طول (بجوار) المعدن المثبت للبناء أو خارج الجدران ما لم ينهار الاهتزاز المتكرر

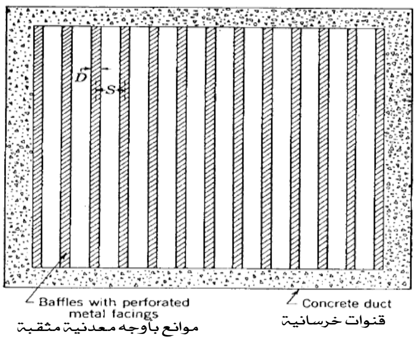
واستخدام جدران ثقيلة.

ألواح ممتصة جيبية

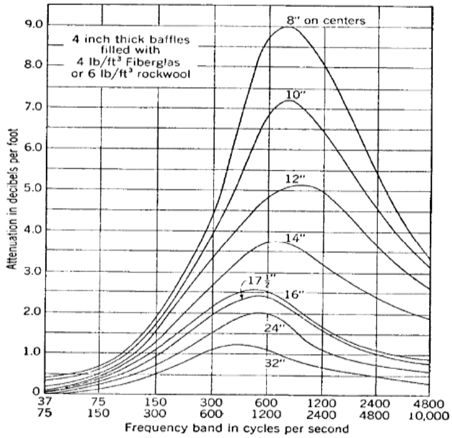
يبين الشكل 11-29 مقطع مرسوم بأبعاد متساوية لمادة مطورة حديثا لاضمحلال الصوت في الممرات الموصلة – للهواء (تباع تحت الاسم المسجل، ممتص التدفق الصوتى). خصائص الاضمحلال لبناء من هذا النوع لوحدات لها "نصف طول موجي" 8 قدم وسمك (بمعنى ضعف السعة) يساوى 5 قدم المبينة في الشكل وذات أطول معالجة قدرها 16، 20، و24 قدم.



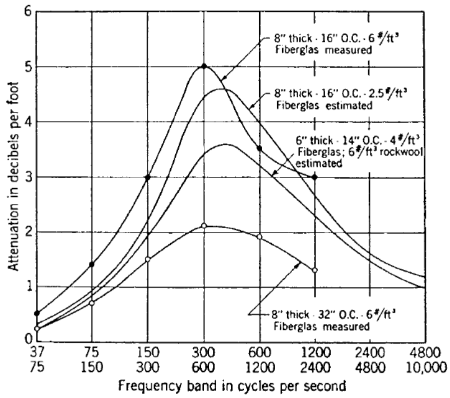
الشكل 11-25 منحنيات الاضمحلال المقاس للمرشحات الثلاثة الموجودة في الشكل 11-24.



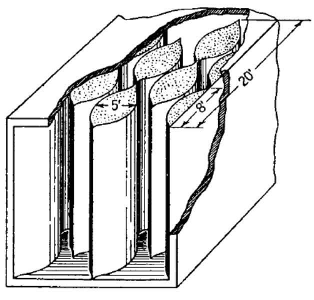
الشكل 11-26 منظر رأسى لنهاية قناة كبيرة تحتوي حواجز (صفائح) متوازية. النسبة المئوية للمساحة المفتوحة تكون $100(S-D)/S$. يكون كل حاجز مبنى من لوحين متوازيين من المعدن المثقب مملوء بزجاج أو صوف معدنى.



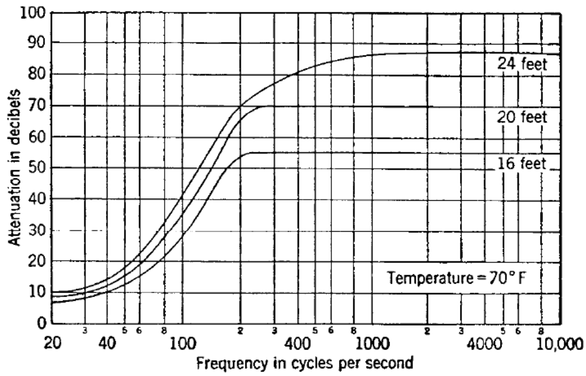
الشكل 11ـ27 الاضمحلال بالديسيبل لكل قدم لحواجز سمك 4 بوصة ومثبتة على أبعاد بين مركزيها كما هو مدون في الشكل. تكون الحواجز مملوءة في العادة بمسيج زجاجى 4 رطل للقدم المكعب أو بصوف صخرى 6 رطل للقدم المكعب. تم افتراض طيف – متصل. تم رسم منحنيات منعمة خلال النقط التجريبية.



الشكل 11ـ28 نفس الشكل 11ـ27 ماعدا أن سمك الحواجز 6 و8 بوصة مملوءة بالمادة الممتصة المبينة



الشكل 11ـ29 رسم متساوى الأبعاد لممتص تدفق صوتى قياسى. كل عمود له أقصى عرض 5 قدم وطول 8 قدم، مقاس من الجزء الرفيع إلى الجزء الرفيع. تنفصل الأعمدة عن بعضها جانبيا بمسافة 4 قدم و10 بوصات.



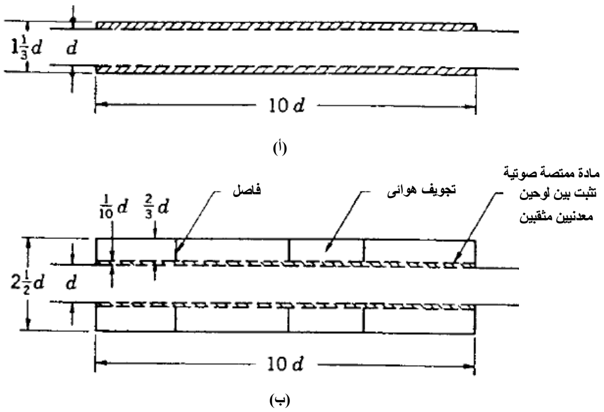
الشكل 11ـ30 منحنيات الأداء لثلاثة أطوال لوحدات امتصاص تدفق هوائى مبنية ومثبتة كما هو مبين بالشكل 11ـ29.

كواتم ممتصة للصوت

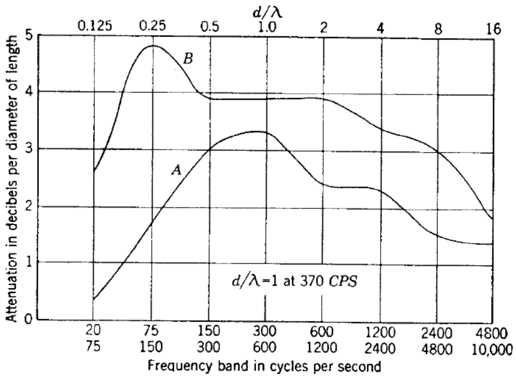
تصنع الكواتم أيضا ببطانات ممتصة. يبين الشكل 11ـ31 بنائين شائعين. تصنع هذه الكواتم في العادة إما بمقطع دائرى أو مربع الشكل. يبين الشكل 11ـ32 بيانات الأداء التقريبى لهذين النوعين من الكواتم في الحالة الخاصة حيث $d/\lambda = 1$ عند 370 Hz. بالتقريب تصلح هذه المنحنيات للحجوم الأخرى للكواتم إذا تم استبدال المحور الأفقى بالتدريج المعطى عند قمة الرسم.

الإرسال المحيطى

كخلاصة، يجب التأكيد على أن البناء الذي يضمحل ـ الصوت لا يكون أفضل من أكثر أجزائه المكونة إرسالا. عندما يراد استعمال خلية اختبار خرسانية لمروحة في موقع ما حيث يتطلب المعيار تخفيض للضوضاء مقداره 60 ديسيبل عند تردد معين، فإنه من غير الجيد إعطاء هذه المقدار من الاضمحلال مع معالجات الدخل والعادم وبعد ذلك يتم اختيار جدران خرسانية تخفف الصوت 45 ديسيبل فقط. أيضا، يجب تذكر أن الصوت سوف يرسل على شكل اهتزازات على طول الأغشية الميكانيكية وسوف يشع كصوت. لذلك، فإن فناء الاهتزاز يجب أن يجهز في فترات تكون كافية للإبقاء على القيمة الكاملة من المعالجة. عادة، يكون فناء الاهتزاز ضرورى في البناءات (الهياكل) الخرسانية والكواتم المعدنية حينما يزيد الاضمحلال عن 25 ديسيبل عند ترددات تحت 100 هيرتز أو يزيد 50 ديسيبل عند ترددات فوق 1000 هيرتز.



الشكل 31.11 بناء نوعين من الكواتم المبددة: (أ) تعبئة صلبة، (ب) فراغات هواء وعمل مقصورات خلف طبقة ممتصة.



الشكل 32.11 أداء الكواتم المبينة في الشكل 31.11، في حالة خاصة عند $d/\lambda = 1$ عند 370 Hz.

مراجع هذا الباب

1- L.L. Beranek, Acoustic Measurements," Chap. 12, pp.516-592, John Wiley & Sons, Inc., New York 1949.

2- C.E. Crede, "Vibration and Shock Isolation," John Wiley & Sons, Inc., New York 1951.

3- M. Hansen and P.F. Chenea, " Mechanics of Vibration," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1952.

4- Dunn and Farnsworth, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 10: 184-199, (1939).

5-K.U. Ingrad, Review of the Influence of Meteorological Conditions of Sound Propagation, *J. Acoust. Soc. Amer.*25:405-411 (1953), much of the material in this chapter can be found in "Handbook of Acoustic Noise Control," vol. 1, Physical Acoustic by Bolt Beranek and Newman, Inc. (1952).

6- R.O. Fehr, the Reduction of Industrial Noise, Pro. 2d Natl. Noise Abatement Symposium (1951).

7- D. J. W. Cullum, "The practical application of Acoustic Principles," pp. 53-61, Spon, Ltd., London, 1949.

8- H.J.. Sabine, "The Absorption of Noise Ventilating Ducts " *J. Acoust. Soc. Amer* 12: 53 (1940).

9- A discussion of classic acoustic wave filters is given by W.P. Mason, " Electromechanical Transdueser and Wave Filters." Pp. 126-143, D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1942, and by F. Olson, "Dynamic Analogies," pp. 52-104, 180-182, Van Nostrand Company, Inc., New York, 1943.

والعشرون

الباب الثانى عشر
قياسات الصوت
ACOUSTIC MEASUREMENTS

الجزء الثامن والعشرون – قياس المستويات الصوتية

الطالب الذي لم يعمل لمدة طويلة في حقل علم الصوتيات لا يدرك أنه في كل مقاييس دراسة الضغط الصوت وسرعة الجسيمات تقريبا تكون ضرورية. هنا نعطى مقدمة قصيرة لموضوع المقاييس السمعية الواسع. يمكن إيجاد المعالجة الأكثر كمالا في مكان آخر.[1-3]

يناقش هذا الجزء تقنية قياس مستويات ضغط، مستويات الصوت، ومستويات القدرة في حزم تردد عروض مختلفة. هذا الجزء يعرض التقنية التى يجب أن تستخدم عند قياس تأرجحات الصوت ويصف تأثير زاوية السقوط على قراءات مقياس مستوى الصوت. يخبرنا هذا الجزء بكيفية اختيار الميكروفونات، المحللات، والمسجلات المطلوبة لغرض معين. تم مناقشة تأثير وجود المشاهد على البيانات المقاسة، وكذلك تأثير المقياس نفسه. أخيرا، يناقش هذا الجزء باختصار استخدام مقياس مستوى – الصوت القياسى الأمريكى.

1.12 مستويات ضغط الصوت والقدرة.

في أغلب الحالات، إن متغير مجال الصوت الذي يقاس لشكل شائع وعاجل جدا هو ضغط الصوت، بدلا من سرعة الجسيمات أو كميات أخرى.

يكون هذا كذلك، بشكل جزئي، لأن ميكروفونات المشتغلة- بالضغط التي سوف تعمل على مدى واسع من الضغوط والترددات تكون أسهل بكثير لبناء ومعايرة ميكروفونات السرعة أو أجهزة قياس الشدة. علاوة على ذلك، الأذن، التي تكون في أغلب الأحيان المستقبل النهائي للأصوات المرغوبة أو غير المرغوبة المراد دراستها، هى آلة تعمل– الضغط.

بسبب المدى الواسع من ضغوط الصوت التى تصادف عمليا، فإن القياسات يتم التعبير عنها في

العادة بدلالة مستوى ضغط الصوت بالديسيبل، المعرف بالصورة،

$$\text{SPL} = 20\log_{10} p + 74\text{db } re\ 0.0002\,\text{microbar} \qquad \text{سلطان } 12\text{-}1$$

حيث p ضغط الصوت بالميكروبار (0.1 نيوتن/م^2 أو 1 داين/سم^2).

يشمل الجهاز الأساسى لقياس مستوى الضغط الصوت على ميكروفون معاير، مكبر معاير، ومبين معاير مثل الأميتر أو مسجل الذبذبات أو مسجلة تخطيطية، كما هو مبين في الشكل 12ـ1. إذا كان الصوت المطلوب قياسه أى شيء أخر غير نغمة نقية (تردد-واحد) فإنه من الضرورى أن يشتمل الجهاز الأساسى على مميزة منتظمة مقابل التردد على طول كامل مدى التردد قيد الاهتمام في الصوت المركب. يشار إلى مثل هذه الآلة "بمقياس مستوى – ضغط – الصوت".

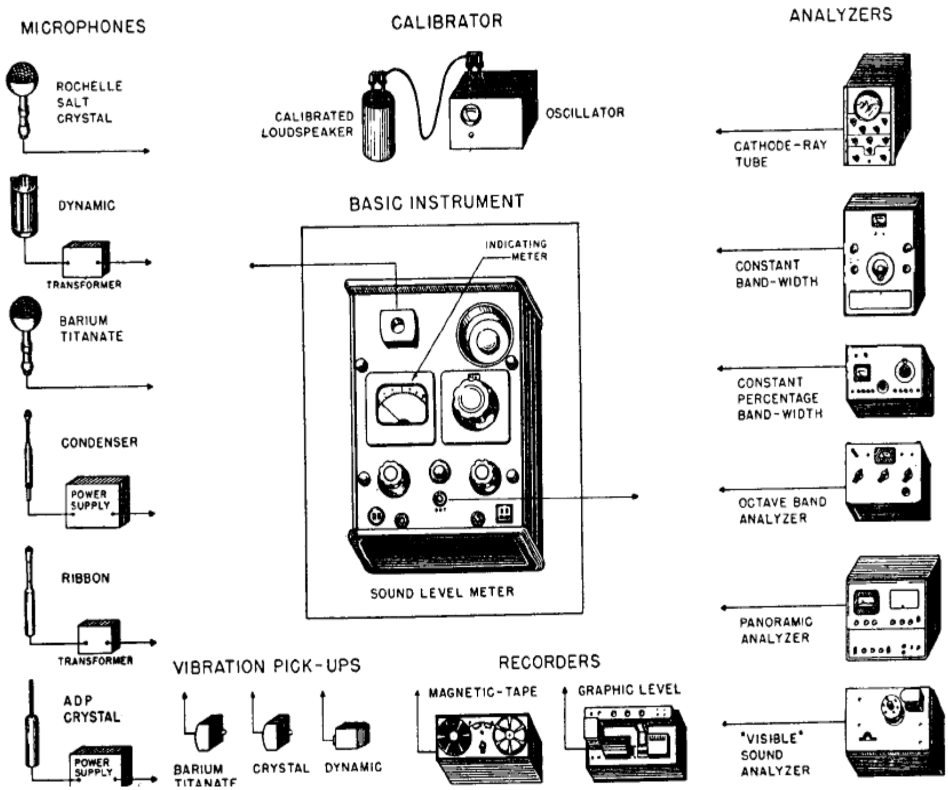
قياس مستوى ضغط الصوت كدالة في التردد

عندما يكون الصوت المطلوب قياسه مركبا، يتكون من عدد من النغمات أو يكون ضوضاء لها طيف متصل، فإن القيمة الواحدة لمستوى ضغط الصوت الكلى المعطاة بالجهاز الأساسى لا تكون في الغالب كافية في الأغراض التحليلية. ربما يرغب أحدهم أيضا معرفة مستوى ضغط الصوت كدالة في التردد. في تلك الحالة، يجب إضافة مرشحات تمرير – حزمة إلى الجهاز الأساسى لكى يمكن قياس ضغط الصوت عند حزم تردد معروفة.

بشكل عام، تستخدم ثلاثة أنواع من المحللات: (1) عرض ـ حزمة ثابت، (2) عرض ـ حزمة ضيقة – لنسبة مئوية ثابت، و (3) عرض ـ حزمة أوكتاف، نصف – أوكتاف أو ثلث ـ أوكتاف. أول هذه الأنواع، محلل عرض ـ حزمة ثابت، يكون حزمة تمرير تكون ذات عرض يساوى عدد ثابت من الدورات. مدى عروض الحزم الشائعة يكون بين 5 و 200 ذبذبة لكل ثانية (هيرتز). في الأغلب، تستخدم الآلة لتعيين المركبات التوافقية للصوت، عندما تكون الترددات مستقرة بشكل كافي بحيث لا تنزاح المركبات إلى داخل أو إلى خارج حزمة التمرير الضيقة أثناء القياس.

النوع الثانى، محلل عرض ـ حزمة ضيقة لنسبة مئوية ثابته، يكون له عرض ـ حزمة يساوى نسبة مئوية ثابتة من تردد منتصف – الحزمة. بالتالى، عند الترددات العالية، تغطى حزمة التمرير مدى واسع من الدورات في الثانية عنه عند الترددات المنخفضة، لذلك يحتاج الشخص أخذ عدد من

القراءات عند الترددات العالية بواسطة هذا النوع أقل منه بواسطة نوع عرض الحزمة الثابت. يكون محلل عرض ـ حزمة ضيقة ثابت – النسبة المئوية مفيدا بشكل خاص في قياس المركبات التوافقية للموجة التى يتأرجح ترددها الأساسى بعض الشيء. إذا كانت الحزمة عريضة بشكل كافي بحيث تحتوي على أساسى متغير، فإنها ستكون عريضة بشكل كافي أيضا عند الترددات الأعلى لتحتوى على أى من التوافقيات.



الشكل 1.12 الجهاز الأساسى لقياس – الصوت مجهز بالملحقات الشائعة المستخدمة في القياسات الصوتية.

النوع الثالث من المحللات هو محلل عرض ـ حزمة أوكتاف، نصف – أوكتاف أو ثلث ـ أوكتاف. يوجد لهذا النوع العديد من التطبيقات في الحالات التى لا تتطلب تفاصيل كبيرة في تحليل ضوضاء الطيف – المتصل. كما تبين التسمية، فإن تردد القطع الأعلى لكل حزمة تمرير لمحلل عرض الحزمة – الأوكتاف يكون ضعف تردد القطع السفلى. بالنسبة لمحلل نصف –

الأوكتاف، يكون تردد القطع العلوى $\sqrt{2}$ من تردد القطع السفلى، وبالنسبة لمحلل ثلث – الأوكتاف، تكون النسبة هى الجذر التكعيبى للعدد 2. المجموعة الشائعة المستخدمة لحزم تمرير الأوكتاف في الجهاز الأساسى هى 37.5 إلى 75، من 75 إلى 150، من 150 إلى 300، من 300 إلى 600، من 600 إلى 1200، من 1200 إلى 2400، من 2400 إلى 4800، و من 4800 إلى 9600 هيرتز.

بواسطة أى من أنواع المحللات هذه، يجب الانتباه إلى أن يكون اضمحلال المرشح خارج حزمة التمرير كافيا. يصبح هذا مهما بشكل خاص في الحالة التى ينحدر فيها طيف الضوضاء بشكل ملحوظ أو عندما يقيس الشخص أصوات لها مستوى – منخفض في وجود أصوات لها مستوى عالى جدا.

بمجرد معرفة مستوى ضغط الصوت كدالة في تردد الحزم، يمكن تعيين مستوى الطيف $S(f)$ لكل حزمة كدالة في التردد بواسطة العلاقة،

$$S(f) = \mathrm{SPL} - 10\log_{10}\Delta f \qquad \mathrm{db} \qquad\qquad 12\text{-}2$$

حيث SPL مستوى ضغط الصوت مقاس بعرض الحزمة Δf ، و Δf عرض الحزمة بالهيرتز، f تردد المركز.

إنّ مستوى الطيف هو ما سوف يقاس إذا كان للمحلل عرض ـ حزمة 1 هيرتز و كان مستوى الطيف منتظم في كافة أنحاء عرض الحزمة Δf . إن مستوى الطيف كمية مفيدة عند مقارنة بيانات مأخوذة بمحللات لها عرض ـ حزمة مختلف. من الواضح أن، اختزال بيانات حزمة عريضة إلى مستويات طيف يكون له معنى فقط إذا كان طيف الضوضاء متصل ولا يحتوي على مركبات بارزة للنغمة – النقية.

لتحويل قراءات حزمة –الأوكتاف بالديسيبل (لضوضاء الطيف ـ المتصل) إلى مستويات طيف بالديسيبل، نستخدم القيم المدونة في الجدول 12ـ1

يمكن تحويل قياسات مستوى ضغط الصوت المقاسة بواسطة محلل له عرض-حزمة Δf إلى مستوى ضغط صوت في عرض –حزمة حرج Δf_c (كما هو مرسوم في الشكل 12ـ2 ومناقش في

الجزء الثلاثين) بواسطة المعادلة التالية،

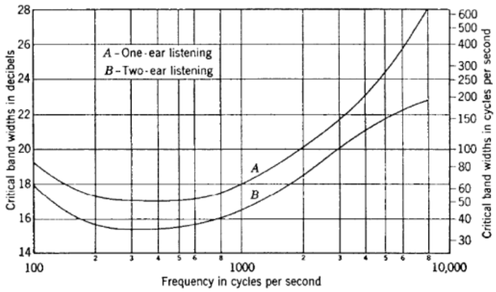
$$SPL_c = SPL - 10\log_{10}\left(\frac{\Delta f}{\Delta f_c}\right) \quad db \qquad 12\text{-}3 \text{سلطان}$$

حيث SPL_c هو مستوى ضغط الصوت في عرض – الحزمة الحرج. يجب تطبيق هذه المعادلة فقط على الضوضاء ذات الطيف ـ المتصل. إذا كانت الضوضاء المراد قياسها خليط من الطيف –المتصل والنغمات النقية وإذا كان الهدف من القياس بيان الأسلوب الذي فيه سيستمع المستمع إلى الضوضاء، فإن البيانات تكون كما هو مرسوم في الشكل 12ـ3. هنا، مستويات ضغط الصوت لجزء الطيف – المتصل للضوضاء تكون لعروض – الحزم الحرجة. تم رسم النغمات النقية كما هى مقاسة بالفعل. حينئذ يشير هذا الرسم مباشرة إلى أن عدد ديسيبلات النغمة النقية يجب أن تخفض عندما تصبح غير مسموعة في ضوضاء الخلفية. للتحويل من قراءات حزمة – الأوكتاف بالديسيبل (لضوضاء الطيف – المتصل) إلى مستويات الحزمة الحرجة بالديسيبل، يمكن استخدام القيم المعطاة في الجدول 12ـ2.

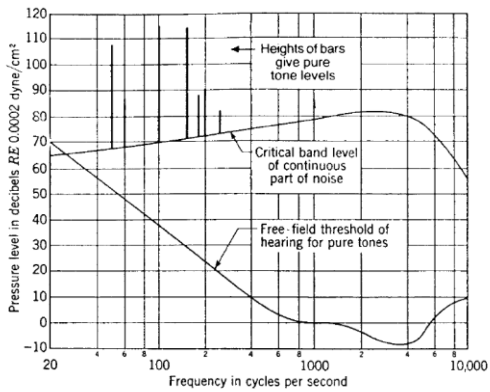
الجدول 12ـ1 تحويل مستويات حزمة –الأوكتاف إلى مستويات طيف (مقربة إلى 0.5 ديسيبل)

Octave band, cps	Number of decibels to be subtracted from octave-band levels	Plot at the frequency, cps
(20–75)	(17)	(39)
37–75	16	52
75–150	19	105
150–300	22	210
300–600	25	420
600–1200	28	850
1200–2400	31	1700
2400–4800	34	3400
4800–9600	37	6800

سلطان



الشكل 2.12 عرض الحزم الحرجة للسمع. (A) سمع بأذن – واحدة. (B) سمع بأذنين – إثنين. المحور على اليمين هو Δf بالذبذبة لكل ثانية (هيرتز). المحور على اليسار هو $10\log_{10}\Delta f$ بالديسيبل.



الشكل 3.12 الطريقة النموذجية لرسم تجمع طيف – متصل وضوضاء ذات طيف – خطي. الجزء المتصل لعروض الحزمة الحرجة معبر عنه بالديسيبل منسوبا إلى شدة المرجع. تم رسم المركبات المنفصلة مباشرة كما هي مقاسة. يعطي المنحنى الناتج عدد الديسيبل التي يجب أن تنخفضها أي مركبة خط إما لتصبح غير مسموعة في وجود ضوضاء الطيف – المتصل، أو إذا كانت الضوضاء موجودة، فإن يجب أن تهبط أسفل المنحنى الحرج.

الجدول 2.12 تحويل مستويات حزمة –الأوكتاف إلى مستويات الحزمة الحرجة (مقربة إلى 0.5 ديسيبل)

Octave band, cps	Number of decibels to be subtracted from octave-band levels	Plot at the frequency, cps
(20–75)	0 (or −1)	(39)
37–75	0 (or −1)	52
75–150	1.0	105
150–300	6.0	210
300–600	9.0	420
600–1200	11.5	850
1200–2400	13.0	1700
2400–4800	13.5	3400
4800–9600	14.0	6800

قياس القدرة الكلية وتوجيهية المصدر

في الكثير من الحالات، يكون من الضروري أخذ قياسات مستوى ضغط الصوت حول آلة أو أي جهاز يولد – ضوضاء أخر ومن هذه القياسات اشتقاق خصائص المصدر بواسطة الكميات والدوال التالية:

1ـ القدرة الصوتية الكلية المشعة بالواط بواسطة المصدر كما هو معبر بمستوى القدرة،

$$\text{PWL} = 10\log_{10} W + 130 \quad \text{db} \qquad 12\text{-}4$$

2ـ السمات الاتجاهية للمصدر، يمكن يعبر عنها بواسطة نماذج التوجيهية أو عند زوايا معينة، معاملات التوجيهية Q (أو أدلة التوجيهية DI).

3ـ السمات الترددية للمصدر، كما يعبر عنها بمستويات القدرة كدالة في التردد معرف في حزم تردد محددة.

مصادر الصوت غير الموجهة

إذا كان مصدر الصوت معروف بأنه غير موجهه وكان موضوعا في الفضاء الحر، فإن القياسات (كدالة في تردد مستوى ضغط الصوت عند موضع واحد على مسافة عدة أقطار مصدرية) تكون كافية لتعيين مستوى ضغط الصوت للمصدر كدالة في التردد. يرتبط مستوى القدرة بمستوى ضغط الصوت المقاس بالعلاقة،

$$\text{PWL} = \text{SPL} + 20\log_{10} r + 10.5 \quad \text{db} \qquad 12\text{-}5$$

حيث r مسافة الميكروفون من المصدر بالقدم. تكونا هذه العلاقة والمعادلة 12ـ6 صحيحتان عند 68^o F و 30 in. Hg. عند درجات الحرارة والضغوط الأخرى يكون من الضروري طرح تصحيح الشكل 10ـ19 من مستوى القدرة.

عندما يوضع مصدر غير موجه في الخلاء، فإن قياسه واحدة تكون مرة أخرى كافية. بمعنى أخر، يتم عمل القياسات في المجال المرتد عند مسافة r من المصدر وإذا كانت المقدار $16\pi r^2$ كبير مقارنة مع ثابت الغرفة R، حينئذ تستخدم المعادلة التالية لتعيين مستوى قدرة الصوت لحزمة تردد

معينة،

$$PWL = SPL + 10\log_{10}\frac{R}{4} - 0.5 \qquad db \qquad 12\text{-}6$$

حيث R ثابت الغرفة بالقدم المربع. لتقدير R ، فإن سمات الامتصاص المتوسط للغرفة كدالة في التردد يجب أن يكون معروفا. إذا كانت التقريبات المعطاة من قبل غير مقبولة، حينئذ يجب استخدام المعادلة 10ـ64 لتعيين قدرة الصوت عند حزمة التردد المعطاة. خلاف ذلك، يجب تحريك المصدر إلى فضاء عديم الصدى.

مصادر الصوت الموجهة

لتقدير سمات مصدر الصوت الموجه يجب عمل المزيد من القياسات المكثفة. عندما يوضع المصدر في الخلاء، فإن مستويات ضغط الصوت عند نقط كثيرة على الكرة المحيطة بالمصدر يجب أن تقاس أو تقدر. يكون نصف قطر الكرة يجب أن يساوى عدة أقطار المصدر لكى تكون البيانات مأخوذة في المجال – البعيد. عمليا، تتم القياسات فقط عند عدد محدود من المواضع حول الآلة (أنظر الشكل 19ـ4)، ويتم تقدير مستويات الصوت عند المواضع الأخرى بطريقة الاستكمال (interpolation) من بين المستويات المقاسة أو باستخدام أى تماثل هندسى في المصدر.

يجب عمل القياسات عند عدد كافي من الأماكن بحيث لا يكون أقصى تغير بين القياسات أكبر من 6 ديسيبل. عند قراءة مقياس مستوى الصوت عند نقطة قياس ما، يجب تسجيل القراءة المتوسطة إذا كان التأرجح الكلى 6 ديسيبل أو أقل. خلاف ذلك، يجب تقسيم المنطقة المحيطة بالمصدر إلى مساحات أكثر.

لتعيين القدرة الصوتية الكلية عند تردد معين، يجب تقسيم الكرة (أو نصف الكرة) التى يجب أن تؤخذ فوقها القياسات إلى نفس عدد المساحات مثل أماكن القياس المستخدمة للحصول على البيانات. يتم إيجاد القدرة W_s (عند درجة الحرارة الطبيعية والضغط الجوى) بالواط التى تمر خلال كل مساحة، عند التردد المعطى، بشكل تقريبى من،

$$W_s = 10^{-13} S \left(\text{antilog}_{10}\frac{\text{SPL}}{10}\right) \quad \text{watts} \qquad 12\text{-}7$$

أسلطان

حيث S مساحة عنصر السطح بالقدم المربع، SPL مستوى ضغط الصوت بالديسيبل، أو من

$$W_s = 10^{-12} S' \left(\text{antilog}_{10} \frac{\text{SPL}}{10} \right) \quad \text{watts} \qquad \text{12-7ب}$$

حيث S' مساحة عنصر السطح بالقدم المربع. (تأتى هذه المعادلات من المعادلات 1ـ18 إلى 1ـ21). بالتالى فإن مجموع القدرات المحسوبة لكل المساحات يمثل القدرة الصوتية الكلية W، بالواط، المشعة بواسطة المصدر عند تردد معطى أو في حزمة أوكتاف معطاة.

يمكن تبسيط الحسابات بشكل كبير بحساب متوسط مستوى ضغط الصوت، $\overline{\text{SPL}}$، بالديسيبل، كمتوسط حسابى لمستويات ضغط الصوت SPL في قطاعات قياس متساوية – المساحة. بالطبع، سوف يوجد بعض الخطأ إذا تم عمل ذلك، ماعدا الحالة التى تكون فيها كل مستويات ضغط الصوت متساوية. تكون قيمة $\overline{\text{SPL}}$ التى تم الحصول عليها بالمتوسط الحسابى بالديسيبل دائما منخفضة جدا. أقصى خطأ للحالة حيث يوجد 10 ديسيبل انتشار يكون 2.6ـ ديسيبل إما لأربعة محطات قياس أو لثمانية محطات. هكذا، فإن الطريقة المجربة التالية قد يمكن تبنيها: إذا انتشار (اختلاف) قيم SPL المقاسة لأربعة أو لثمانية محطات قياس يكون حول 10 ديسيبل و أن SPL بالديسيبل تم توسيطها، أضف 1 db إلى المتوسط للحصول على قيمة $\overline{\text{SPL}}$. في العادة، سيكون الخطأ في قيمة $\overline{\text{SPL}}$ الناتجة أقل من ± 1 db. إذا كان انتشار القيم المقاسة 5 ديسيبل أو أقل، لا تضيف تصحيح. هنا أيضا، دائما سيكون الخطأ أقل من 1 db .

تم إعطاء طرق تقسيم السطح الكروى إلى 10 أو 20 قطاع متساوى المساحة في الجزء الحادى عشر. عمليا، في أغلب الأحيان يكون مستحيلا الحصول على قراءات على سطح يحيط المصدر بالكامل، على مسافة تساوى عدة أقطار مصدرية. مع ذلك، فإن نماذج الإشعاع المتولدة بواسطة مصدر صوتى كثيرا ما تظهر بعضا من التماثل الأمر الذي معه يمكن افتراض أن مستوى ضغط الصوت ثابت على طول خط معين. على سبيل المثال، السماعة الموضوعة بشكل متماثل داخل حاجز كبير تولد في أغلب الأحيان نموذج توجيهية يكون متماثل بالنسبة لدوائر حول المحور الرئيسة للإشعاع. بشكل مماثل، في أغلب الأحيان يتم افتراض أن نموذج التوجيهية المتولد

بواسطة مصدر ضوضاء، موضوع على سطح مستوى، يكون متماثل حول بعض المحاور. القياسات في مستوى أفقي على امتداد الدائرة المحيطة بالمصدر حينئذ ستكون كافية. إذا وضع مصدر صوت موجه في الخلاء، واحد يجب أن نتأكد بأن قياسات الصوت المباشر المحمول – بالهواء تكون بدون أي مساهمة ملحوظة من للصوت المنعكس. للتأكد من أن الصوت المنعكس لا يشارك بشكل ملحوظ في القراءات، فإن مستوى ضغط الصوت المتوسط المقاس عند نقط القياس المختارة يجب أن تكون 8 ديسيبل أعلى من مستوى ضغط الصوت المتوسط المقاس عند نقط أبعد، حيث يكون الصوت المنعكس سائدا. لكن، نقطة القياس يجب أن تبقى عدة أقطار مصدرية بعيدة من المصدر لكي نكون متأكدين بأن تلك النقطة تكون في المجال – البعيد.

حساب معامل التوجيهية

يمكن أيضا حساب معامل التوجيهية بعد تعيين مستوى ضغط الصوت المتوسط $\overline{\mathrm{SPL}}$. يمكن تعيين $\overline{\mathrm{SPL}}$ بالطريقة التقريبية الموصوفة من قبل أو بواسطة استخدام العلاقة،

$$\overline{\mathrm{SPL}}_r = \mathrm{PWL} - 20\log_{10} r - 10.5 \text{ db} \qquad 12\text{-}8$$

حيث PWL مستوى القدرة للمصدر عند حزمة تردد معطاة، r نصف القطر بالقدم الذي يتعين مستوى ضغط الصوت المتوسط له.

يرتبط دليل التوجيهية $\mathrm{DI}_{(\theta,\phi)}$ في اتجاه معين المعطى بواسطة الزوايا θ و ϕ مع مستوى ضغط الصوت $\mathrm{SPL}_{(r,\theta,\phi)}$ المقاس عند المسافة r بالعلاقة،

$$\mathrm{DI}_{(\theta,\phi)} = \mathrm{SPL}_{(r,\theta,\varphi)} - \overline{\mathrm{SPL}}_r \qquad 12\text{-}9$$

سلطان

يتم الحصول على معامل التوجيهية $Q_{(\theta,\phi)}$ من دليل التوجيهية بواسطة تحويل قيمة DI بالديسيبل إلى نسبة قدرة، بمعنى،

$$Q_{(\theta,\phi)} = \operatorname{antilog}_{10} \frac{DI_{(\theta,\phi)}}{10} \qquad 12\text{-}10$$

اختيار الميكروفون

يجب اختيار الميكرفون المستخدم في قياس مستويات ضغط الصوت لملائمته للأصوات المعينة التي ستقاس. إذا كان المطلوب قياس مستويات صوت منخفضة جدا، فإن أنواع معينة فقط من الميكروفونات تكون مناسبة. إذا كانت القياسات مطلوبة عند ترددات منخفضة جدا أو عند ترددات مرتفعة، تكون أنواع أخرى أكثر مناسبة للمهمة. إذا كان للمتانة اعتبار مهم على حساب أقصى استجابة ترددية، فإنه يجب عمل اختيار مختلف للميكروفونات.

في الفقرات المقبلة، سوف نناقش بشكل منفصل مشاكل قياس مستويات الصوت المنخفضة، مستويات الصوت العالية، ضوضاء التردد – المنخفض، ضوضاء التردد – العالى، وتأثيرات تغير درجة الحرارة، المعالجة الصارمة، والكابلات الطويلة.

مستويات الصوت المنخفضة

يجب أن يكون للميكروفون الذي يستخدم في قياس مستويات الصوت المنخفضة " ضوضاء ذاتى" منخفض و يجب أن يولد جهد خرج كافي ليسيطر (ليغلب) على الضوضاء عند دخل أنبوبة المكبر الأول في مقياس مستوى – الصوت. ميكروفونات ملح روشيل والملف – المتحرك تكون مناسبة بشكل مثالى لقياسات مستويات الصوت المنخفضة. لكلا النوعين جهد خرج عالى بشكل كافي يسمح بقياس مستويات الصوت المنخفضة حتى 20 ديسيبل مع مرجع 0.0002 ميكروبار تقريبا. إن مستوى الضوضاء البيئي للميكروفون البلوري يكون منخفض جدا عندما يتحدد بمدى التردد بمنطقة فوق 20 هيرتز. إن مستوى الضوضاء البيئي للميكروفون الديناميكي يكافئ مستوى ضغط صوت 15 ديسيبل. لهذا، باستخدام الميكروفون الديناميكى يكون من الممكن قياس مستويات صوت صغيرة حتى 20 ديسيبل بدقة جيدة جدا.

مستويات الصوت العالية

طبيعيا، يمكن استخدام ميكرفونات ملح روشيل، الملف – المتحرك، وميكروفونات المكثف في قياس مستويات الصوت العالية التى لا تزيد عن 140 ديسيبل. بالنسبة للمستويات الأعلى،

يمكن الحصول تجاريا على ميكروفونات مصممة خصيصا من نوع البلورة أو نوع المكثف ذات أغشية متصلبة.

ضوضاء التردد – المنخفض

غن ميكروفونات البلورة والمكثف هى الأكثر مناسبة لقياس الضوضاء عند الترددات – المنخفضة. بواسطة أى من هذين النوعين، يمكن إجراء القياسات بدقة حتى كسر من الدورة إذا تم استخدام مكبر من نوع خاص. تكون القيود عند الترددات المنخفضة، إذا وجدت، بالكامل في المكبر، حيث أن كلا النوعان يستجيبان للضغوط الإستاتيكية بالإضافة إلى الضغوط المترددة.

ضوضاء التردد – العالى

للقياسات حتى حوالى 12000 هيرتز يعطى ميكروفون المكثف نتائج مقبولة. بالنسبة للقياسات فوق 12000 هيرتز يكون أكثر أنواع الميكروفونات مناسبة هى ميكروفونات البلورة الصغير جدا. تكون المتطلبات الأولية للقياس الدقيق عن الأصوات العالية التردد هى الحجم الصغير والخلو من قمم الرنين في الميكروفون نفسه. هذه القيود في العادة تعنى تخفيض كبير في الحساسية.

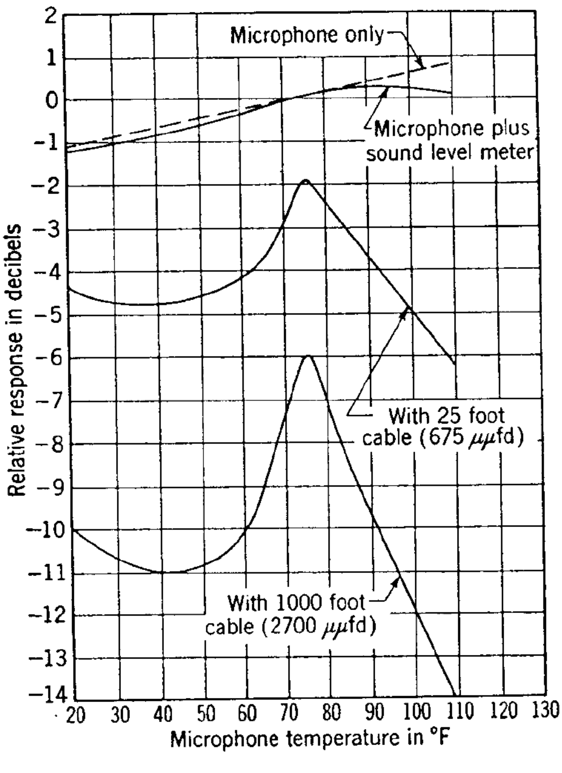
درجة الحرارة المختلفة

عندما يجب أن يعمل الميكروفون حيث تتغير درجة الحرارة بشكل مأساوى من وقت لأخر، فإن استجابته خصاصة الأخرى المصاحبة يجب ألا تكون دالة قوية في درجة الحرارة. لميكروفون بلورة ملح روشيل النموذجي سمات درجة الحرارة المبينة في الشكل 12-4. إنه يحتاج تصحيحات درجة حرارة لها مقدار كبير إذا ما أستخدم مع كابل. تكون جهود خرج ميكروفونات الملف – المتحرك، الضمامه (خشبة الإسناد العرضية، ribbon)، وميكروفون المكثف تكون أقل تغيرا مع درجة الحرارة وتخدم تطبيقات متنوعة حيث لا يكون ميكروفون ملح روشيا مناسبا لتغير درجة حرارة الوسط المحيط. سوف يعمل الكثير من هذه الأنواع في درجات حرارة حتى 200^o F تقريبا، بالرغم من أن البيانات الدقيقة ، بشكل خاص، تتلف بالكامل عند 130^o F، ويجب عدم استخدامها

عند درجات حرارة أعلى من 113^{o} F.

الرطوبة

بشكل عام، لا تتأثر معظم الميكروفونات الحديثة نسبيا بالتغيرات الكبيرة في الرطوبة النسبية. لكن، يجب تجنب فترات التشغيل الممتدة في رطوبة نسبية أكبر من 85 ٪، وإذا كان الأمر ضروري، يجب تقديم بعض وسائل التجفيف. يكون التجفيف مهما بوجه خاص لميكروفونات المكثف.



الشكل 4.12 تغير في الاستجابة كدالة في درجة حرارة الميكروفون لميكروفون بلورة ملح روشيل نموذجي له سعة 1600 ميكروفاراد عند 70^{o} F ، في حالة ميكروفون بلورة ملح روشيل وحده ومع أطوال مختلفة للكابل بين الميكروفون ودخل مكبر مقياس مستوى – الصوت. [2]

الكابلات الطويلة

إذا كان من الواجب استخدام كابلات طويلة، فإن خرج الميكروفون يجب أن يكون عند معاوقة منخفضة. يمكن تحقيق هذا إما باستخدام محول توافق-معاوقة أو دائرة أنبوبة – مفرغة (مكبر

إشارة) عند الميكروفون أو باختيار ميكروفون ذا عنصر نقل طاقة منخفض –المعاوقة. يمكن استخدام ميكروفون الملف – المتحرك مع كابلات بأى طول تقريبا بشرط أن تكون مقاومة الدائرة معلومة وأن خرج الميكروفون يتم تصحيحه لأخذ فقد الكابل في الاعتبار. يمكن استخدام ميكروفونات المكثف أو البلورة مع كابلات حتى 200 قدم طول بشرط تطبيق تصحيحات الكابل على البيانات المقاسة.

قياس الأصوات المتأرجحة

عندما تتأرجح شدة الصوت المراد قياسه، فإن قيم ضغط الصوت التى تقاس سوف تعتمد على السمات الديناميكية للمبين المستخدم. سوف يعتمد نوع المبين المختار على خاصية مستوى الضغط الصوت التي ستقاس. من الطبيعى، إذا رغب أحدهم في قياس القمم الآنية للضغوط، فإن جهاز راسم الذبذبات (الأسلوسكوب) سيكون ضروريا. يمكن استخدام مقاييس " سريعة "، أو مسجلات المستوى البيانى العالية – السرعة في فحص التغيرات السريعة نسبيا في مستوى ضغط الصوت. للحصول على قيم متوسطة على زمن ـ طويل، يتم استخدام المقاييس " البطيئة " أو المسجلات التى يتعمد جعل استجابتها بطيئة جدا عن طريق التصميم الملائم لدوائرها الكهربية أو الميكانيكية. تكون قيمة متوسط الزمن – الطويل ومدى القمم والمنخفضات الآنية لضغط الصوت عادة كافية إحصائيا لتوصيف الصوت في الأغراض العملية.

الأصوات عند المس (السحج، grazing) والسقوط العشوائي

لقياس مستويات ضغط الصوت بشكل صحيح يجب تذكر أن استجابة معظم الميكروفونات تتغير بشكل أو بآخر مع اتجاه الصوت الساقط علية. بالنسبة لمعظم أنواع أغشية الميكروفونات، يتم الحصول على سمات الاستجابة الأكثر استواء للصوت الساقط بشكل عشوائى. تكون هذه الاستجابة تقريبا مثل استجابة صوت سقوط–المس. لكن كلتا الإستجابتين السقوط العشوائي وسقوط المس تختلفان بشكل كبير عن استجابة الصوت الساقط بشكل طبيعى عند الترددات التى عندها لم تعد أبعاد الميكروفون صغيرة مقارنة مع الطول الموجى للصوت. لذلك، يجب وضع الميكروفون بحيث عندما يحمل مقياس مستوي الصوت بالأسلوب المعتاد، فإن الصوت قيد القياس يرتطم على الحجاب الحاجز (الغشاء) للميكروفون عند زاوية سقوط المس. في حجرة

الارتداد، يسقط الصوت بشكل عشوائى تقريبا ويكون توجيه الميكروفون ضعيف التمييز. عند أى فرصة، إذا سقط صوت منعكس بقوة عند الترددات العالية على الحجاب الحاجز للميكروفون، فإنه قد تتولد أخطاء جدية.

2.12 مستوى- الصوت ومقياس مستوى – الصوت

السمات

عند قياس الضوضاء، كثيرا ما يكون من المرغوب استعمال أجهزة لها إشارات تكون مرجحة وموزونة بموجب الأسلوب الذي فيه تستجيب الأذن البشرية للضوضاء. لم يتم اختراع مثل هذا المقياس، لكن المقياس تمت معايرته وتوحيده ليقيس شيء قريب يماثل مستوى الصخابة. تسمى القراءات المأخوذة من هذا المقياس "بمستويات الصوت".

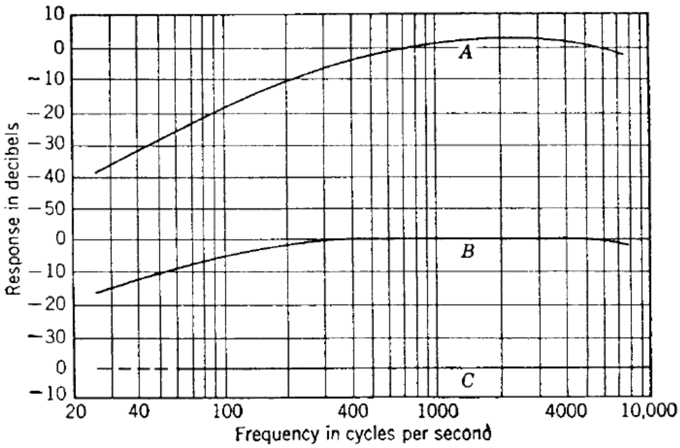
نشرت جمعية المعايير الأمريكية مجموعة من المواصفات التي فيها تم تحديد المتطلبات الواجب توافرها في مقياس مستوي – الصوت القياسي.[4] تستخدم ثلاث شبكات للوزن لمحاكاة استجابة آلية السمع هى شبكات النغمات النقية ذات المستوى – المنخفض، المستوى- المتوسط، أو المستوى- المرتفع. تعطى الشبكات A، B، و C سمات استجابة تكون بالتقريب عبارة عن كنتورات تساوى – الصخب لمعكوس 40 - فون، 70 – فون، و 100 – فون على الترتيب، كما هو مبين بالشكل 2-5.12. (الفون هو وحدة قياس جهاز الصوت، phon) من التعريف، مستوى الصوت للضوضاء هو عبارة عن قراءة مقياس مستوى – الصوت مبنى بحيث يوافق متطلبات القياس الأمريكى ويعمل كالاتي: استخدم الشبكة A إذا كانت القراءات بين 24 إلى 55 ديسيبل، والشبكة B إذا كانت القراءات بين 55 إلى 85 ديسيبل، والشبكة C إذا كانت القراءات أكبر من 85 ديسيبل. تؤخذ القراءات عادة بواسطة كل شبكة من شبكات الوزن الثلاثة. من هذه القراءات، يمكن الحصول على معلومات بخصوص توزيع التردد للضوضاء. إذا كان مستوى الصوت واحد على كل الشبكات، فإن الطاقة الصوتية من المحتمل أن تكون سائدة عند ترددات أعلى من 500 هيرتز. إذا كان مستوى الصوت واحد للشبكتين B و C، لكن أقل من الشبكة A، فإن الصوت من المحتمل أن يكون سائد عند ترددات بين 150 و 1000 هيرتز. أخيرا، إذا كان

مستوى الصوت الأكبر مع الشبكة C، فإن الصوت يكون سائد عند ترددات أسفل 150 هيرتز.

من المؤكد أنه بالرغم من أن شبكات الوزن هذه تكون مفيدة في إعطاء مستوى صخابة للنغمات النقية، إلا أنها لا تكون قادرة على إعطاء مستوى صخابة الضوضاء المعقدة. سيناقش هذا الموضوع أكثر في فصل 13. بما أن الشبكة C لها استجابة موحدة (منتظمة) مع التردد، فإن ربما تستعمل أيضا لقراءة مستويات ضغط الصوت.

تأثير المشاهد وعلبة المقياس على البيانات المقاسة

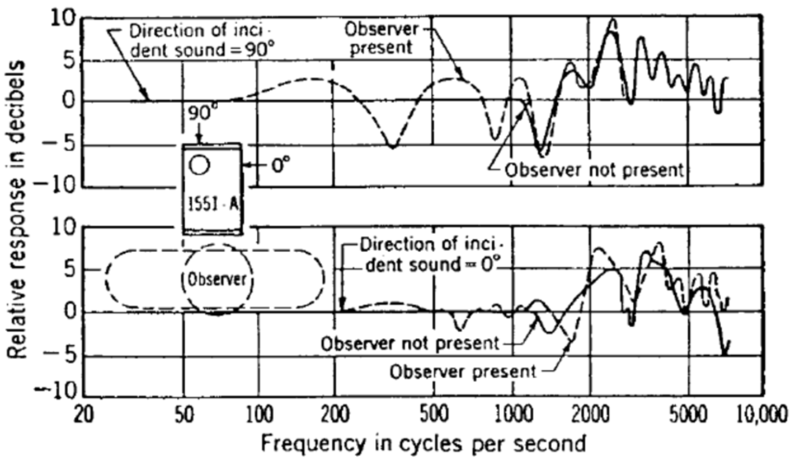
إذا كان مقياس مستوى – الصوت محمول بين أيدي المشاهد، فإن القراءات عند الترددات العالية سوف تضطرب بسبب وجوده. يمكن تقدير مقدار الخطأ في أحد أنواع مقاييس مستوى – الصوت من مقارنة الخطوط المتقطعة والخطوط المتصلة في الشكل 12ـ6. تبين هذه البيانات وجود فرق بين قراءات المقياس في وجود وغياب المشاهد، كما تقارن مع استجابة ميكروفون بمفردة عندما تم استخدامه في نهاية كابل طويل. يظهر موقعان: (1) مقياس مستوى – الصوت بين المشاهد ومصدر الضوضاء، و (2) مصدر الضوضاء موضوع على أحد جوانب المشاهد، ومقياس مستوى الصوت مثبت امام المشاهد. تبين المنحنيات أن الخطأ يكون أصغر عندما يثبت مقياس مستوى – الصوت أمام المشاهد مع مجيئ الصوت من على جانبه (0^o).



الشكل 12ـ5 مميزات استجابة – التردد مأخوذة من القياس الأمريكي لمقاييس مستوى – الصوت، Z24.3-1941.

علبة (صندوق) المقياس نفسها من الممكن أيضا أن تفسد مجال الصوت عند الميكروفون، كما هو مبين بالخطوط المتصلة في الشكل 6.12. يكون تأثير علبة المقياس أكبر عند الترددات العالية منه عند الترددات المنخفضة، ويتغير هذا التأثير بشكل كبير مع زاوية السقوط.

عندما يكون مطلوب بيانات دقيقة جدا، يجب توصيل الميكروفون إلى المقياس بكابل تمديد. في هذه الحالة، يجب تثبيت الميكروفون يصل الصوت المشع مباشرة من الماكينة يصل الميكروفون من الجانب بسقوط مماس، كما ناقشنا من قبل.



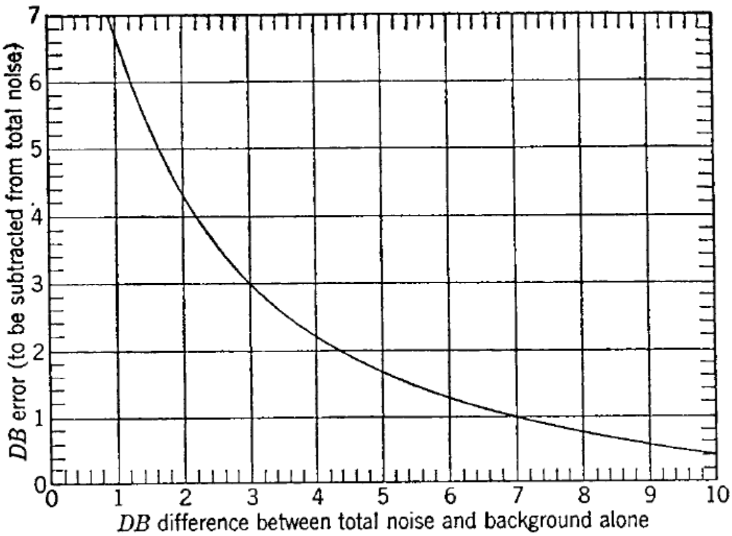
الشكل 6.12 تأثير الاستجابة الترددية باستخدام ميكروفون موجه على مقياس مستوى – صوت من نوع الراديو العام 1551-A في وجود وعدم وجود مشاهد. تم الحصول على قراءات الديسيبل باستخدام موجة صوتية مستوية تردد – منفرد في غرفة عديمة الصدى، وهى الفرق بين الاستجابة تحت الظروف المبينة واستجابة الميكروفون وحده[5] .

3.12 تأثير ضوضاء الخلفية

مستوى ضغط الصوت المتولد بماكينة معينة يجب في أغلب الأحيان أن يقاس في موضع حيث يكون من المستحيل عزل الضوضاء بالكامل من مصادر أخرى. في الحالة المثالية، يجب أن تعين القياسية فقط الصوت المباشر المحمول – بالهواء من الماكينة، بدون أى مساهمة ملموسة من الضوضاء المحيطة من مصادر أخرى. إذا كانت الضوضاء المحيطة في موضع الاختبار سوف تهمل، فإن مستواها يجب أن يكون على الأقل 8 ديسيبل تحت مستوى ضغط الصوت المتولد بالماكينة قيد الفحص. عندما ينجز هذا الشرط، فإن مستوى ضغط الصوت المقاس يحتوي على خطأ يقدر

فقط بكسر من الديسيبل نتيجة ضوضاء الخلفية.

إذا كان مستوى ضوضاء الوسط ثابتا، فإنه يمكن تطبيق تصحيح للبيانات المقاسة طبقا للمعلومات المعطاة في الشكل 12-7. على سبيل المثال، إذا كان اتحاد ضوضاء الوسط والجهاز 4 ديسيبل أكبر من ضوضاء الوسط وحده، فإنه من الشكل 12-7 نجد أنه يجب طرح 2.2 ديسيبل من قراءة الضوضاء الكلية للحصول على مستوى الصوت نتيجة الجهاز بمفردة.



الشكل 12-7 تصحيح ضوضاء الخلفية لقياسات مستوى – الصوت.

4-12 المعلومات المطلوب تسجيلها

يجب أن يشير المراقب كجزء من نتائجه إلى كل الشروط التى تحتها تم أخذ البيانات. من الواجب أن يسجل:

1- وصف الفضاء الذي فيه تم عمل القياسات: طبيعة وأبعاد الأرضية، الجدران، والسقف. وصف وموقع الأجسام والموظفين القريبين.

2- وصف الجهاز تحت الاختبار (مبدئيا مصدر الضوضاء): الأبعاد، بيانات لوحة الأسمة، الحقائق الوثيقة الصلة التي تتضمن سرعة، قدرة، معدلات، حجوم الترس أو البكرة، الخ أنواع وظروف التشغيل. موضع الجهاز ونوع الحمل والتثبيت.

3- وصف مصادر الضوضاء الثانوية: الموضع والأنواع. أنواع التشغيل.

4. الأرقام المتسلسلة وأرقام النوع الموجودة على كل الميكروفونات، مقاييس مستوى –الصوت، والمحللات المستخدمة. طول ونوع كابلات الميكروفون المستخدم.

5. أماكن المشاهد.

6. أماكن واتجاهات الميكروفون أثناء الفحوصات.

7. تدريجات الوزن وسرعة المقياس المستخدمة على مقياس مستوى – الصوت.

8. درجة حرارة الميكروفون.

9. طيف الضوضاء المحيط بالجهاز المطلوب فحصه وليس في التشغيل.

10. كمية التأرجحات، زائد أو ناقص، للمقياس.

11. نتائج الصيانة وفحوصات المعايرة.

12. أسم المشاهد.

13. تاريخ ووقت الفحص.

عند عمل القياس لتعيين مدى تعرض الموظفين للضوضاء فإن المواد التالية تكون أيضا ذات أهمية:

1. الموظفين المتعرضين – بشكل مباشر وغير مباشر.

2. نموذج الزمن للتعرض

3. محاولات السيطرة على الضوضاء وحماية الموظفين

4. فحوصات القياسات السمعية.

تم اقتراح نشرة بيانات من صفحتين كما تتبين في الصفحة التالية.

الجزء الثامن والعشرون – معايرة تبادل محولات الطاقة

يتم معايرة ميكروفونات المعمل القياسية بواسطة تقنية أولية، بمعنى، تقنية تعتمد فقط على الطول، الكتلة، الزمن، ونسب كميات أخرى. يوجد العديد من التقنيات الأولية لمعايرة الميكروفون، لكن، ماعدا تقنية التبادل. تعتمد هذه التقنيات بشكل عام على افتراضات صعبة التحقيق أو تقتصر على مدى معين من التردد.

PAGE 1

SOUND SURVEY

DATE ____________

ORGANIZATION ______________________

ADDRESS ______________________________

INSTRUMENTS USED

SOUND-LEVEL METER – TYPE ____________ MODEL # ____________

MICROPHONE ________ TEMPERATURE ________ CABLE (Length) ________

ANALYZER – TYPE ____________________ MODEL # ____________

OTHERS ______________________________

NOTE: If noise is directional, record – Distance of the source, microphone position, incidence on microphone (Normal, Grazing, Random).

____

____

INDUSTRY ____________________ TYPE OF MACHINE ____________

MACHINE MODEL # ______________ NUMBER OF MACHINES ________

LOCATION OF MACHINE IN ROOM ______________________

ENVIRONMENT (Type of building, walls, ceiling, etc.; other operations, any attempts at sound control)

____

____

____

PERSONNEL EXPOSED – DIRECTLY ____________ INDIRECTLY ____________

EXPOSURE TIME PATTERN ______________________

ARE EAR PLUGS WORN ______________ TYPE ____________

ARE THERE AUDIOMETRIC EXAMINATIONS ______________

PREPLACEMENT ______________ PERIODIC ____________

Note information as to who makes these examinations, conditions under which they are made, time of day they are made, where records are kept.

____

____

____

____

____

Engineer ______________

PAGE 2

DATE ____________

SOUND LEVEL VALUES (DECIBELS)

NOTE: Record A, B and C Networks Readings from the Sound-Level Meter

LOCATION

Time

Flat 0

FREQUENCY RANGES (Cycles per Second)

37.5 75

75-150

150-300

300-600

600-1200

1200-2400

2400-4800

4800-10,000

Flat 0

5ـ12 مبدأ التبادل

إنّ مبدأ التبادل مشروح في أى من نصوص نظرية الدائرة ـ الخطية. أحد الأشكال السهلة لهذا المبدأ، ينص على أنه عندما يتم توصيل مولد تيار ـ ثابت i إلى طرفي شبكة كهربية سلبية خطية وتم قياس فرق جهد الدائرة – المفتوحة e عبر طرفي الشبكة الأخريين، ثم، كتجربة ثانية، إذا تم توصيل نفس مولد التيار ـ الثابت i إلى المجموعة الثانية من أطراف الشبكة، فإن نفس جهد الدائرة ـ المفتوحة e سيتم قياسه عبر الطرفين الأولين.

في الدائرة التى تتكون من إثنين من محولات الطاقة الكهروميكانوصوتية القابلة للعكس الخطية مقترنين بوسط غازى (أنظر الشكل 8ـ12)، نقول بالمثل: بفرض أن مولد التيار – الثابت i_1 متصل بأطراف محول الطاقة 1 فإنه يترتب على هذا الفعل أن يتولد جهد دائرة – مفتوحة e_2 عبر أطراف محول الطاقة 2. حينئذ، وكتجربة ثانية، بفرض أن مولد التيار – الثابت i_2 متصل بأطراف محول الطاقة 2 فإنه يترتب على هذا الفعل أن يتولد جهد دائرة – مفتوحة e_1 عبر أطراف محول الطاقة 1. بواسطة نظرية التبادل يكون،

$$\frac{e_2}{i_1} = \frac{e_1}{i_2} \qquad \text{12-11}$$

سلطان

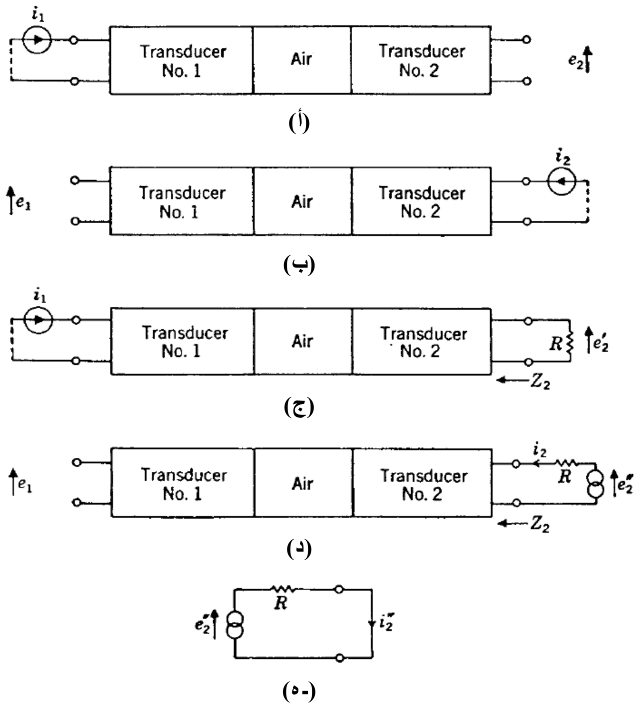
بالرجوع للشكل 8ـ12 (ج)، (د)، و (هـ)، فإنه بواسطة نظرية التبادل يمكننا كتابة،

$$\frac{e'_2}{i_1} = \frac{e_1}{i''_2} \qquad \text{12-12}$$

حيث i''_2 تيار دائرة – القصر لمولد له المعاوقة الداخلية R و جهد الدائرة ـ المفتوحة e''_2. يستخدم هذا المولد في الشكل 8ـ12(د) ليولد الجهد e_1.

كبرهان للمعادلة 12ـ12، دعنا نفترض أن المعاوقة الداخلية لأطراف محول الطاقة 2 هى Z_2. حينئذ فإن الجهد e'_2 (أنظر الشكل 8ـ12ج) يرتبط بجهد الدائرة – المفتوحة e_2 (أنظر الشكل 8ـ12أ) بالعلاقة،

$$e_1 = \frac{R + Z_2}{R}\, e'_2$$ سلطان12-13



الشكل 8ـ12 رسوم تخطيطية لتجربة من خطوتين تعرض استعمال نظرية التبادل لإثنين من الشبكات القابلة للعكس الخطية السلبية لمحولات طاقة متصلتين معا بوسط مرن (هواء). تنص نظرية التبادل على $e_2/i_1 = e_1/i_2$ **أو** $e'_2/i_1 = e_1/i''_2$.

أيضا، يرتبط التيار i_2 (أنظر الشكل 8ـ12 (ب) و (د)) بالجهد e''_2 بالعلاقة،

$$i_2 = \frac{e''_2}{R + Z_2}$$ سلطان12-14

من الشكل 8ـ12هـ

$$i_2 = \frac{R\, i''_2}{R + Z_2}$$ سلطان12-15

بالتعويض بالمعادلات 13ـ12 و 15ـ12 في المعادلة 11ـ12 نحصل على المعادلة 12ـ12.

تجعل المساواة المعطاه في المعادلة 12ـ12 من الممكن معايرة محول الطاقة بواسطة ما يسمى

بتقنية التبادل، كما سوف نرى باختصار.

6ـ12ـ توجيهية محولات الطاقة القابلة للانعكاس

كامتداد إضافي لنظرية التبادل، يمكن القول بأن نماذج التوجيهية لمحول طاقة معين عند نفس المسافة r (الشكل 9ـ12) تكون كما هى سواء كان المستخدم ميكروفون أو سماعة. في حالة القيم الكبيرة للمسافة r فإن نماذج التوجيهية لا تعتمد على r لأن ضغط الصوت يتناقص خطيا r إذا كانت r كبيرة بشكل كافي.

في الشكل 9ـ12، يظهر زوج من محولات الطاقة، أحدهما يمكن أن يدور في مستوى عند زاوية θ. إذا كان جهد الدائرة – المفتوحة للمحول 2 يتغير كدالة في θ، ولتكن $e_2 = E_2 f_2(\theta)$ مثلا، فعند تطبيق تيار ثابت i_2 في أطراف المحول 1، وإذا كان جهد الدائرة ـ المفتوحة e_1 للتيار الثابت i_2 المطبق عبر المحول الأخر يساوى $E_1 f_1(\theta)$، فإنه من المعادلة 11ـ12 نحصل على،

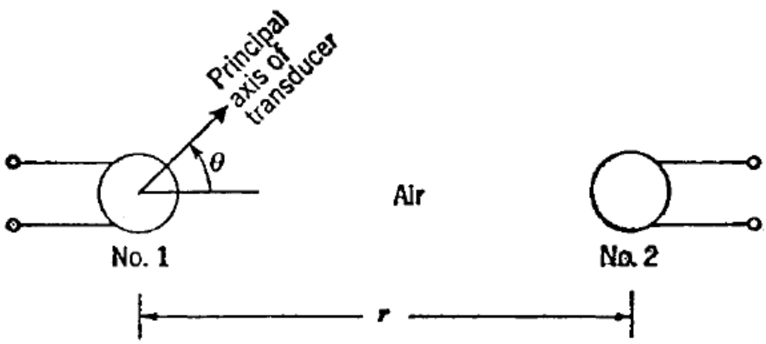
$$\frac{E_2 f_2(\theta)}{i_1} = \frac{E_1 f_1(\theta)}{i_2} \qquad 12\text{-}16$$

إذا كان $f_1(\theta) = f_2(\theta) = 1$ للزاوية $\theta = 0$، نحصل من المعادلة 11ـ12 على،

$$\frac{E_2}{i_1} = \frac{E_1}{i_2} \qquad for\ \ \theta = 0 \qquad 12\text{-}17$$ سلطان

بالتالى، عند كل الزوايا،

$$f_2(\theta) = f_1(\theta) \qquad 12\text{-}18$$ سلطان



الشكل 9ـ12 إثنين من المحولات الكهروميكانوصوتية في الهواء.

7.12 استجابة الميكروفون لموجة – حرة – مستوية

عادة نهتم بتعيين استجابة جهد الدائرة ـ المفتوحة لميكروفون e_{oc} عندما يوضع الميكروفون في موجة صوت حرة مستوية لها ضغط صوت p_{ff} قبل إدخال الميكروفون. بوحدات الديسيبل نحصل على،

$$\Re = 20\log_{10}\frac{e_{oc}}{p_{ff}} + 20\log_{10}\frac{p_{ref}}{e_{ref}} \qquad \text{db} \qquad 12\text{-}19$$

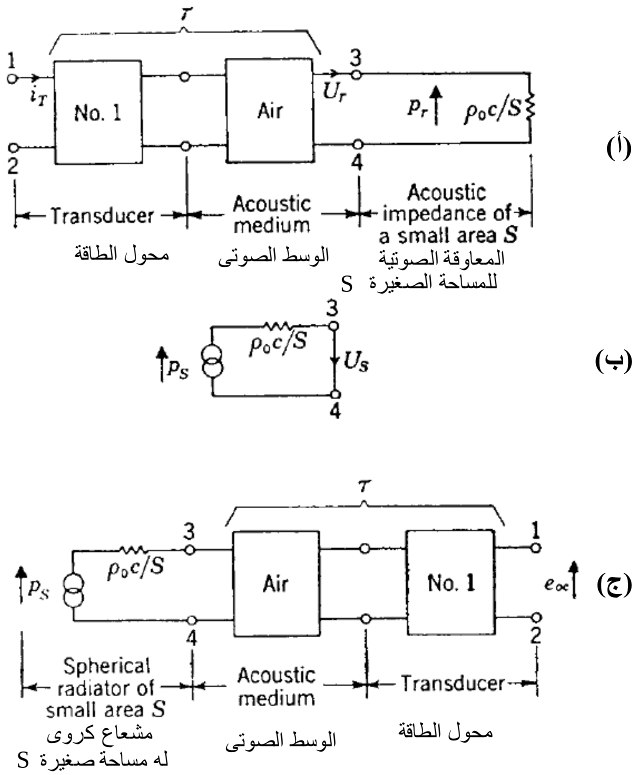
حيث p_{ref} و e_{ref} الضغط والجهد المرجعيين على الترتيب. في الغالب، تؤخذ هذه الكميات كـ 1 داين/سم^2 و 1 فولت على الترتيب، لكي يكون الحد الثاني على الطرف الايمن من المعادلة 12ـ19 صفرا. إنها الكمية $\Re$ التي نرغب في تعيينها بتقنية التبادل.

8.12 نظرية التبادل للأنظمة الكهروميكانوصوتية

بالرجوع للشكل 12ـ9 ، دعنا نعتبر المحول 1 المحول الذي تكون الاستجابة $\Re$ كدالة في التردد مطلوبة، ودعنا نعتبر أن المحول 2 هو محول إضافي. لتطبيق مبدأ التبادل بدون خطأ، يجب أن يحقق مجال الصوت المشع بالمحول 2 شروط معينة. سوف نرى أن هذه الشروط سوف تتحقق باستخدام محول قابل للانعكاس سلبى خطى بشرط أن وجوده في التجربة لا يؤثر في قيمة $\Re$ للمحول الأخر وبشرط أن المحولات تكون موضوعة في المجالات – البعيدة بالنسبة إلى بعضهما البعض. تم تعريف المجال – البعيد لمحول الطاقة في الجزء العاشر على أنه جزء الوسط خلف المسافة r من المحول بحيث يكون ضغط الصوت المار على امتداد الخط القطرى خلال المركز الصوتى له يتغير في تناسب عكسى مع المسافة r.

عند دفع المحول 1 بواسطة تيار كهربى i_r ، فإنه سوف يشع صوت. دعنا نختار مساحة صغيرة جدا S ، في المجال – البعيد للمحول، عمودية على صدر الموجة المشعة عند مكان المحول 2، لكن في عدم وجود هذا المحول. دع هذه المساحة الصغيرة S تكون ممثلة بمعاوقة صوتية. دعنا نمثل محول الطاقة 1 بشبكة رباعية الأقطاب كالمبينة في الشكل 12ـ10. يمثل الهواء الواقع بينها

وبين المساحة الصغيرة جدا S بشبكة ثانية رباعية – الأقطاب متصلة على التوالى وتنتهى بالمعاوقة الصوتية للمساحة S.



الشكل 10.12 رسوم تخطيطية لمحول طاقة و وسط صوتى في تناظر من نوع – المعاوقة.

يفترض أن تكون المساحة الصغير S بعيدة بشكل كافي عن المحول لكون تكون المعاوقة الصوتية $\rho_o c/S$. حينئذ، بواسطة امتداد نظرية التبادل المثبتة في الفصل 5.12،

$$p_r = \tau i_T \qquad \text{from Fig.} 12-10\text{a} \qquad 12\text{-}20 \text{ سلطان}$$

$$e_{oc} = \tau U_S \qquad \text{from Fig.} 12-10\text{b and c} \qquad 12\text{-}21 \text{ سلطان}$$

حيث i_T التيار الكهربى بالأمبير المزود للمحول 1 عندما يعمل كسماعة.

r_{oc} هو جهد الدائرة – المفتوحة المتولد بالمحول 1 عندما يعمل كميكروفون في مجال صوت المحول 2. يتم قياس ضغط صوت المجال – البعيد عند المسافة r، p_{ff}، قبل إدخال المحول.

U_r السرعة الحجمية بالمتر المكعب لكل ثانية لجسيمات الهواء العمودية على المساحة الصغيرة جدا S الموجودة عند مسافة r من المحول 1 في غياب المحول 2. تتولد هذه السرعة بواسطة التيار i_T في ملف محول الطاقة 1.

p_r ضغط الصوت بالنيوتن لكل متر عند هذه المساحة الصغيرة جدا S الموجودة عند مسافة r من المحول 1 في غياب المحول 2. لاحظ أن $p_r = \rho_o c U_r / S$.

p_S ضغط الصوت بالنيوتن لكل متر الذي سوف يتولد عند سطح مولد صوت له المساحة S ومعاوقة صوتية داخلية $\rho_o c / S$ إذا أنتهى بمعاوقة صوتية ما لانهاية.

U_S السرعة الحجمية بالمتر المكعب لكل ثانية التى سوف تتولد عند سطح مولد صوت له المساحة S ومعاوقة صوتية داخلية $\rho_o c / S$ إذا أنتهى بمعاوقة صوتية صفر. لاحظ أن.

τ ثابت التبادل لمحول الطاقة 1 زائد الوسط الصوتى مع نهاية معاوقة – صوتية $\rho_o c / S$ و نهاية كهربية دائرة – مفتوحة.

9.12 المعادلة العامة للمعايرة

لكى تنطبق نظرية التبادل، يجب أن يولد المحول 2 نفس مجال الصوت كما لو كان له نفس المعاوقة الصوتية الداخلية مثل التى تظهرها المساحة الصغيرة جدا S لموجة مستوية، بمعني، $\rho_o c / S$. نعين الأن هذا مجال الصوت. عند نقط في المجال – البعيد ($r > r_c$) لمصدر صغير له المساحة S ، يمكن معالجة المصدر كما لو كان مشعاع كروى بسيط له المساحة $S = 4\pi a^2$ مع معاوقة داخلية $\rho_o c / S$. لمثل هذا المصدر المثالى، يكون ضغط صوت المجال – الحر (غير المضطرب) p_{ff} عند مسافة r على الصورة،

$$p_{\text{ff}} = \frac{p_o a}{r} e^{-jkr} \qquad 12\text{-}22$$

من المعادلة 64.2 نحصل على

$$Z_{AS} = \frac{j\,\omega\rho_o\,a}{S} \qquad \text{سلطان}12\text{-}23$$

حيث Z_{AS} معاوقة الإشعاع الصوتية بالأوم الصوتي في النظام م كجم ث لمصدر كروي له نصف قطر صغير جدا بالمتر، a و p_o ضغط الصوت عند سطح الكرة بالنيوتن لكل متر مربع.

الدائرة الصوتية للمحولنا الكروي الصغير تعطى بالشكل 12.11. من هذه الدائرة نرى أنه بالتقريب،

$$p_S \approx \frac{p_o\,c}{j\omega\,a} \qquad \text{سلطان}12\text{-}24$$

حيث p_S تعرف بالمعادلة 12.21. هذه المعادلة تصلح إذا كان $c >> |\omega a|$. بالتعويض من المعادلة 12.24 في 12.22، مع تذكر أن $S = 4\pi a^2$ و $p_S = U_S\,\rho_o\,c/S$ نحصل على،

$$p_{ff} = \frac{j\omega p_S S}{4\pi rc}e^{-jkr} = \frac{U_S\rho_o c}{2\lambda r}e^{j(\pi/2-kr)} \qquad \text{سلطان}12\text{-}25$$

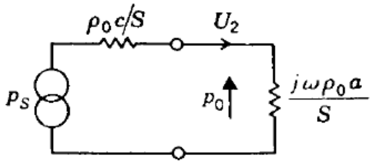
عند التعويض بالمعادلة 12.25 في المعادلة 12.21 نحصل على،

$$e_{oc} = \tau\frac{p_{ff}\,2\lambda r}{\rho_o c}\,e^{j(kr-\pi/2)} \qquad 12\text{-}26$$

من المعادلة 12.20 و 12.26 نحصل على،

$$\frac{e_{oc}}{p_{ff}} = \frac{p_r}{i_r}\frac{2\lambda r}{\rho_o c}\,e^{j(kr-\pi/2)} \qquad 12\text{-}27$$

النسبة الموجودة على الطرف الأيسر من هذه المعادلة تكون المعايرة المطلوبة للميكروفون. يجب علينا الآن أن نبتكر وسائل لتعيين مقدار النسبة الموجودة في بداية الجانب الأيمن بدون اللجوء إلى قياس p_r. توجد طريقتين لعمل هذا. تسمى أحد الطرق طريقة التبادل – الذاتي وتسمى الأخرى طريقة محول الطاقة – الإضافي.

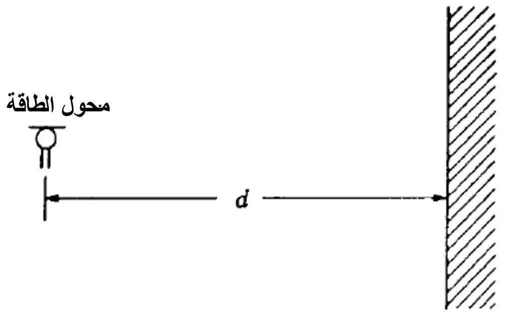


الشكل 11.12 دائرة صوتية لمصدر كروى صغير مع معاوقة داخلية $\rho_o c / S$ ونصف قطر a.

10.12 طريقة التبادل – الذاتى لمعايرة المجال – الحر (أنظر الشكل 12.12)

السمات الأساسية لهذه الطريقة هى محول الطاقة المطلوب معايرته، جدار مستوى صلب كبير، والجهاز الكهربى لفصل المحول عن مصدر القدرة الكهربية وتوصيله إلى مكبر سمعى في كسر صغير من الثانية.

في إجراء التجربة، يتم توصيل الميكروفون إلى مولد تيار – ثابت يولد قطار من الموجات لها التردد الذي يراد عنده عمل المعايرة ولها طول كافي لتحقيق شرط الحالة – شبه – الثابتة في الجزء الأوسط من قطار الموجات. يتم قياس تيار الحالة – شبه – الثابتة i_T المار إلى الميكروفون. يسافر قطار الموجات من الميكروفونات نحو جدار كبير وتنعكس إلى الميكروفون مرة أخرى.



الشكل 12.12 شكل التجربة لمعايرة محول طاقة بطريقة التبادل – الذاتى.

بينما تكون الموجة في العبور، تفصل الدائرة الكهربية أطراف محول الطاقة عن المولد وتصلها إلى مكبر لكي يعمل المحول كميكروفون. عندما تصل قطار الموجة المنعكسة محول الطاقة، يتم قياس جهد الدائرة – المفتوحة e_{oc}. يتم التعبير عن البيانات بالنسبة e_{oc} / i_T.

الكمية r في المعادلة 27.12 تساوى $2d$، وهى المسافة الكلية التى سافرتها الموجة. يكون

ضغط الصوت p_{ff} الواصل عند الميكروفون في الموجة المنعكسة تماما مثل p_r ، التى يبعث بواسطة المحول عندما يعمل كسماعة. حينئذ، يمكننا كتابة،

$$\frac{e_{oc}}{i_T} = \frac{p_r}{i_T}\frac{e_{oc}}{p_{ff}} \qquad 12\text{-}28$$

بالتعويض بالمعادلة 12ـ28 في المعادلة 12ـ7 ينتج،

$$\frac{e_{oc}}{p_{ff}} = \sqrt{\frac{e_{oc}}{i_T}\frac{4\lambda d}{\rho_o c}}\; e^{-j(\pi/4-kd)} \qquad 12\text{-}29$$

حيث e_{oc} هو جهد الدائرة – المفتوحة المتولد للمحول بالفولت، p_{ff} ضغط لصوت المجال – الحر بالنيوتن لكل متر مربع الذي يعمل على توليد جهد الدائرة المفتوحة e_{oc}. $k = 2\pi/\lambda$ تكون بالمتر-^{1}، $\rho_o c$ المعاوقة المميزة للهواء، بالرايلي في م كجم ث (نيوتن-ثانية لكل متر مكعب).

في القياس، القيمة المطلقة لـ e_{oc} و i_T لا تكون مطلوبة، بل النسبة بينهما فقط، كما تتعين بواسطة مقياس جهد معاير. علاوة على ذلك، يكون القياس الدقيق لكل من d والتردد مطلوب ايضا ، ولأن $\rho_o c$ تكون دالة في كل من درجة الحرارة والضغط الجوى فإنه يجب تعيين T و P_o.

12ـ11 طريقة المحول – الإضافي لمعايرة المجال – الحر

لطريقة التبادل ـ الذاتى عيبان مهمان من الناحية العملية. تحتاج هذه الطريقة إلى أجهزة إلكترونية معقدة لأداء تشغيل الفتح (التحول)، وجدار عاكس صلب في الفضاء. في الواقع، أرضية الخرسانة الناعمة في مركز فضاء كبير جدا في الخلاء يحقق متطلبات الجدار العاكس فيما عدا الفضاء العديم الصدى.. مع ذلك، يكون نوع "الرادار" للجهاز الإلكترونى مطلوب دائما، ويجب مكافحة تقلبات الطقس معه.

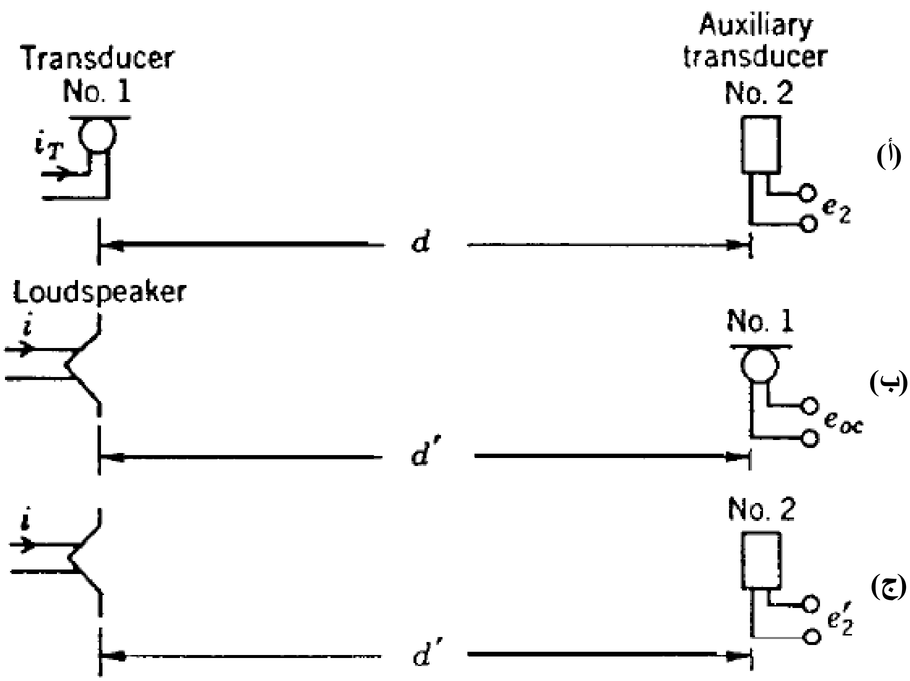
مع استخدام محول طاقة إضافي وغرفة عديمة الصدى، فإنه يتم تجنب جهاز التحول وضرورة إداء القياسات في الهواء الطلق. بهذه الطريقة، يتم قياس خرج محول الطاقة قيد المعايرة (رقم 1) بواسطة

محول إضافي (رقم 2) عند مسافة d (أنظر الشكل 12-13أ. ثم يتم مقارنة حساسية المحول 1 مع حساسية المحول 2 بوضعهم على التوالى في نفس مجال الصوت وإيجاد نسبة جهود خرجهم المركبة (أنظر الشكل 12-13 (ب) و (ج). في الاختبارين (ب) و (ج)، يجب أن تكون المسافة d' كبيرة بشكل كافي بحيث لا يحدث تفاعل بين السماعة والمحولين، وتحتاج ألا تساوى d.

من هذه القياسات تصبح النسبة الأولى لما تحت الجذر في المعادلة 12-29 على الصورة،

$$\frac{e_{oc}}{i_T} = \frac{e_2}{i_T}\frac{e_{oc}}{e'_2} \qquad 12\text{-}30$$

حيث i_T التيار بالأمبير الممدود للمحول 1 عندما يعمل كمصدر، e_2 جهد الدائرة – المفتوحة بالفولت المتولد بواسطة المحول 2 في الاختبار (أ)، e_{oc} جهد الدائرة – المفتوحة بالفولت المتولد بواسطة المحول 1 في الاختبار (ب)، و e'_2 جهد الدائرة – المفتوحة بالفولت المتولد بواسطة المحول 2 في الاختبار (ج).



الشكل 12-13 الخطوات التجريبية لمعايرة محول الطاقة في المجال – الحر بواسطة طريقة المحول – الإضافي.

بالتعويض بالمعادلة 12ـ30 في 12ـ29 تعطى،

$$\frac{e_{oc}}{p_{ff}} = \sqrt{\frac{e_2}{i_T}\frac{e_{oc}}{e'_2}\frac{2\lambda d}{\rho_o c}}\; e^{-j(\pi/4 - kd/2)} \qquad \text{12-31}$$

سلطان

تكون كل الكميات في الوحدات الكهربية العملية وفي وحدات م كجم ث. لاحظ هنا أن المسافة الكلية التى تسافرها الموجة هى d بدلا من $2d$ كما كان الحال في طريقة التبادل – الذاتى.

يتم إيجاد الاستجابة المرغوبة $\Re$ بالديسيبل بإدخال المعادلة 12ـ31 في المعادلة 12ـ19.

12ـ12 استجابة الضغط لميكرفون

أحيانا، نكون مهتمين بتعيين استجابة جهد الدائرة – المفتوحة لميكروفون e_{oc} نتيجة ضغط الصوت المتوسط p_d على الحجاب الحاجز. عند التعبير بوحدات الديسيبل يكون لدينا،

$$\Re_d = 20\log_{10}\frac{e_{oc}}{p_d} + 20\log_{10}\frac{p_{ref}}{e_{ref}} \qquad \text{12-32}$$

تم مناقشة الكميات p_{ref} و e_{ref} بعد المعادلة 12ـ19.

13ـ12 طريقة المحول – الإضافي لمعايرة الضغط

بمعايرة الضغط للميكروفون فإننا نعنى تعيين النسبة بين جهد الدائرة – المفتوحة وضغط الصوت عند الحجاب الحاجز الذي يولده. سوف نرمز للضغط عند الحجاب بالرمز p_d ولجهد الدائرة – المفتوحة e_{oc}.

بشكل عام، يتم أداء هذا النوع من التحليل على الميكروفونات التى تكون صغيرة الحجم، التى يتعرض الحجاب فيها للصوت على جانب واحد فقط، والتى يكون لها المعاوقة الميكانيكية للحجاب كبيرة. الميكروفونات التى تحقق هذه المواصفات تكون في الغالب ميكروفونات من الأنواع الكهروضغطية أو الكهروستاتيكية، بالرغم من أن ميكروفونات النوع

الكهرومغناطيسى قد تعاير في تصميمات خاصة.

مع هذا النوع من المعايرة في العادة يتم استخدام محولين إضافيين. يبين الشكل 14.12 ترتيب توصيل المحولات خلال اجزاء الفحص الثلاثة.

نشير للمحول المراد معايرته بالرقم 1 والمحولين الإضافيين بالرقم 2 والرقم 3. خلال كل جزء من الأجزاء الثلاثة للفحص يقترن المحولين بواسطة تجويف ذى جدار – صلب (بعد إدخال الميكروفون له حجم V_A. للأحجبة الحاجزة للمحولات 1 و 2 معاوقات صوتية Z_{AD1} و Z_{AD2} على الترتيب. تكون معاوقة حجاب المحول 3 غير ذات أهمية.

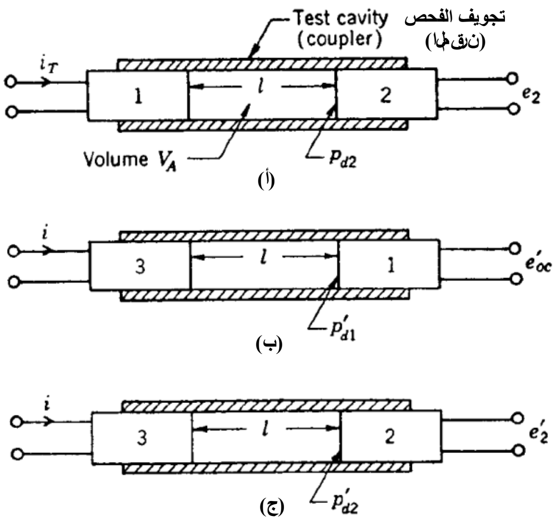
لتبسيط التحليل، سوف نفترض التى:

$$Z_{AD1} = Z_{AD2} \qquad 12\text{-}33 \text{ سلطان}$$

$$|Z_{AD1}| >> \frac{1}{\omega C_A} \qquad 12\text{-}34 \text{ سلطان}$$

حيث C_A المطاوعة الصوتية للتجويف المقترن،

$$C_A = \frac{V}{\gamma P_o} \qquad 12\text{-}35 \text{ سلطان}$$



الشكل 14.12 الخطوات التجريبية لمعايرة ضغط محول طاقة بطريقة المحول ـ الإضافي.

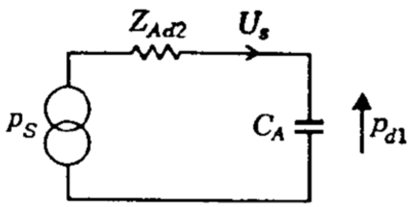
حيث $V = S\,l$ و l طول التجويف و S مساحة المقطع العرضي، و P_o الضغط الجوى، و γ نسبة الحرارات النوعية. يجب أن يكون الطول l أقل من 1\20 إلى 1\50 من الطول الموجى وهذا يعتمد على الدقة المطلوبة (أنظر الجزء الثالث عشر الفصل 5ـ5).

كما في حالة معايرة ميكروفون المجال – الحر (أنظر المعادلات 12ـ20 و 12ـ21)، يكون لدينا علاقات التبادل،

$$p_{d2} = \tau\, i_T \qquad \text{12-36 سلطان}$$

$$e_{oc} = \tau\, U_S \qquad \text{12-37 سلطان}$$

حيث p_{d2} ضغط الصوت بالنيوتن لكل متر مربع عند وجه حجاب المحول 2 في التجربة (أ) من الشكل 12ـ14. p_S هو ضغط الصوت بالنيوتن لكل متر مربع الذي سوف يتولد في التجويف بواسطة المحول 2 عندما يعمل كمصدر عندما تكون معاوقة التجويف ما لانهاية، U_S السرعة الحجمية بالمتر المكعب لكل ثانية لحجاب المحول رقم 2 عندما يعمل كمصدر عندما تكون معاوقة التجويف صفر.



الشكل 12ـ15 الدائرة الصوتية لمحول طاقة بمعاوقة صوتية Z_{AD2} يعمل على تجويف له مطاوعة صوتية C_A.

عندما يعمل المحول 2 كمصدر، كما هو مطلوب بالمعادلة 12ـ37، يكون لدينا الدائرة المبينة في الشكل 12ـ15. من الدائرى نرى أن،

$$p_{d1} = \frac{p\,s}{j\omega C_A\, Z_{AD2} + 1} \approx \frac{p\,s}{j\omega C_A\, Z_{AD2}} \qquad \text{12-38 سلطان}$$

أو

$$p_{d1} \approx \frac{U_S}{j\omega C_A}$$ سلطان 12-39

تكون المعايره التى نرغبها هى e_{oc} / p_{d1} ، أى أن،

$$\frac{e_{oc}}{p_{d1}} = e_{oc} \frac{j\omega C_A}{U_S}$$ سلطان 12-40

من المعادلات 12ـ36، 12ـ37، و 12ـ40 نحصل على،

$$\frac{e_{oc}}{p_{d1}} = j\omega C_A \frac{p_{d1}}{i_T}$$ سلطان 12-41

لكن، نرى أن

$$\frac{p_{d2}}{i_T} = \frac{e_2}{i_T} \frac{p_{d2}}{e_2}$$ 12-42

نحصل على النسبة e_2 / u_T من التجربة (أ) في الشكل 12ـ14. من (ب) و (ج) في الشكل 12ـ14 نحصل على e'_{oc} / e'_2.

الأن p_{d2} / e_2 يجب أن تساوى p'_{d2} / e'_2 لأن المحول 2 أفترض أنه خطى، و p_{d1} / e_{oc} يجب أن تساوى p'_{d1} / e'_{oc} لنفس السبب. بالتالى، يمكننا إعادة كتابة المعادلة 12ـ42 على الصورة،

$$\frac{p_{d2}}{i_T} = \frac{e_2}{i_T} \frac{p'_{d2}}{e'_{oc}} \frac{e'_{oc}}{e'_2}$$ سلطان 12-43

لكن، في (ب) و (ج) من الشكل 12ـ14، $p'_{d1} = p'_{d2}$ لأن $Z_{AD1} = Z_{AD2}$ ، بالتال نحصل على،

$$\frac{p_{d2}}{i_T} = \frac{e_2}{i_T} \frac{p_{d2}}{e_{oc}} \frac{e'_{oc}}{e'_2}$$ سلطان 12-44

بالتعويض بالمعادلة 12ـ44 في المعادلة 12ـ41 نحصل على المعادلة المطلوبة،

$$\frac{e_{oc}}{p_{d1}} = \sqrt{\frac{e_2}{i_T} \frac{e'_{oc}}{e'_2} j\omega C_A}$$ سلطان 12-45

مراجع هذا الباب

1- Leo L. Beranek, Acoustic Measurements," Chap. 12, pp.516-592, John Wiley & Sons, Inc., New York 1949.

2- P.G. Peterson and Leo L. Beranek, "Handbook of Noise Measurement," General Radio Company, Cambridge, Mass., 1953.

3- E.G. Richardson, "Technical Aspects of Sound" Elsevier Publishing Company, Inc., New York, 1953.

4- American Standards Z243-1944, "Sound Levels Meters for Measurements of Noise and Other Sounds," American Standards Association, New York.

5- Courtesy of General Radio Company, Cambridge, Mass.

518

الباب الثالث عشر

وضوح السمع، التخاطب والمعايير النفسصوتية

HEARING, SPEECH INTELLIGIBILITY AND PSYCHOACOUSTIC CRITERIA

الجزء الثلاثون – السمع

إن آلية السمع هى المستقبل النهائي للأصوات المتولدة بالأنظمة السمعية. يجب أن يعرف مصممو الأنظمة السمعية مدى الترددات والضغوط الصوتية التى تستجيب لها هذه الآلية والأسلوب الذي يتم فيه تقديم أصوات الحديث (التخاطب) والموسيقى إلى المستمع إذا كان من المفروض أن يكتسب كمية مقبولة من المعلومات والسرور من الإشارة السمعية. في هذا الباب يتم تغطية بعض المميزات الأساسية للسمع والتخاطب. تكون المشكلة أكثر تعقيدا من عدم وجود متسع هنا، لذلك، نوصي بقوة بأن ترجع إلى النصوص الأكثر تخصصا للمزيد من الدراسة.[1-3] .

إن الفيزيائي أو المهندس يجب أن يقتربا من دراسة السمع كما لو كان يعتبر نظام – يسلك – بشكل جيد وله طريقة عمل مفهومة بشكل جيد جدا. في العلوم الطبيعة تقاس كميات مثل الكتلة، طول الموجة، الجهد، والكثافة. في اختيارنا أى من الكميات يجب أن تدرس يكون دليلنا المعرفة المكتسبة من النظرية ومن القياسات المتعلقة. علاوة على ذلك، بشكل عام يكون من الممكن تثبيت كل الثوابت ماعدا بضعة من المتغيرات المستقلة وقياس سلوك النظام مع تغيير بضع متغيرات بشكل منظم. في الكثير من الأنظمة، من الممكن عمل تراكب لنتائج كميات تتغير بشكل منفرد للحصول على السلوك تحت شروط حيث تتغير عدة كميات بشكل آني.

في الدراسات النفسصوتية يمكننا أيضا قياس، أو على الأقل معدل، كميات مثل مجرد إثارات محسوسة، مجرد اختلافات ملحوظة، بداية للألم، نشاط عصبي متزايد، حب وكراهية شخصية، وهلم جرا. مع ذلك، فإن الموقف يكون مختلف في الفيزياء، لأنه لا يوجد في الغالب جسم نظري من

المعرفة ليوجهنا إلى ما يشكل قياسه صحيحة، أو إلى تلك المادة التى تكون المتغيرات لها مهمة أو تكون مساعدة. في القياسات النفسصوتية، من الصعب جدا جعل جزء من المتغيرات المستقلة ثابتة، وعموما لا يتحقق مبدأ التراكب. سريعا ما يتعلم التجريبيون بأن الاستجابة التى تم الحصول عليها كنتيجة للمحفز المقدم إلى مستمع تحت مجموعة واحدة من الشروط لا تكون تماما مثل الاستجابات التى تم الحصول عليها لنفس المحفز بعد أن يحتاج المستمع موقف عقلي مختلف نحو التجربة، التجريبى، أو نحو شيء آخر. في نظرية الشبكات سوف نتحدث عن الشروط الابتدائية المختلفة.

في قراءة المادة التالية يجب أن تأخذ في الاعتبار أن البيانات المقدمة تم الحصول عليها بواسطة مجربون معينون يستعملون محفزات معينة، مقدمة إلى مستمعين معينين محيزيين روحيا، تحت تأثير شروط بيئية معينة. يترتب على ذلك، المجربون الآخرون الذين يكررون نفس التجربة قد يحصلون على نتائج مختلفة بشكل كبير مالم يبذلوا عناية عظيمة لتكرار كلّ العوامل المشتركة في التجربة. للمزيد من المناقشة المفصلة في الدلالات غير التقنية للقياسات النفسية أنظر مرجع هيرش.[3].

في هذا الباب سوف ندرس إحساس السمع الذي ينتج من تحفيز آلية السمع. تشتمل آلية السمع على الأجزاء الميكانيكية في الأذن، النظام العصبى السمعى بما فيه المخ، ومؤشر الاستجابة التى يمثلها الإنسان بالكامل.

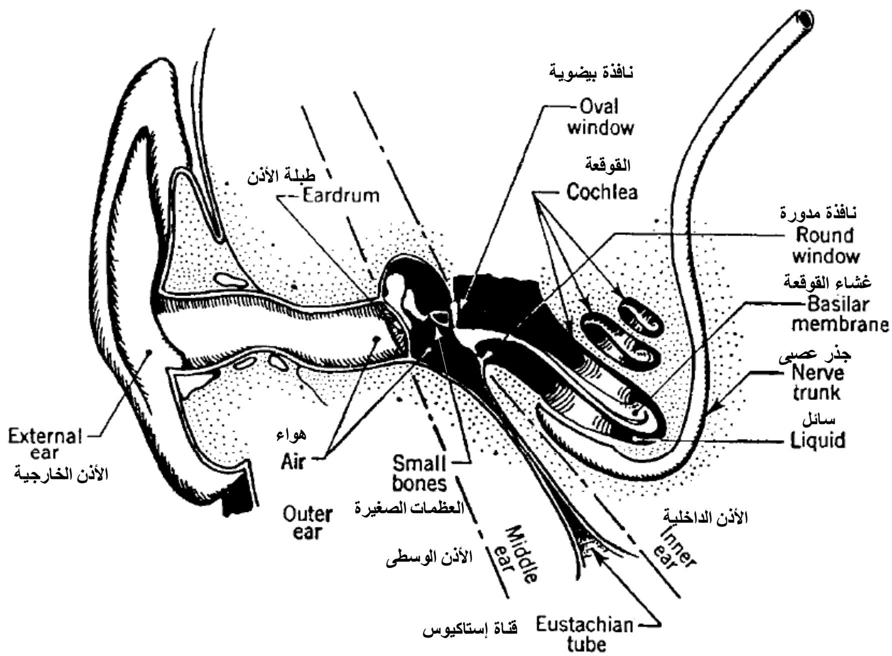
لا يوجد جهاز فيزيائى يمتلك خصائص أروع من الخصائص التى تمتلكها الأذن. إنها لا تستطيع فقط أن تقاوم الأصوات الأكثر حدة المتولدة في الطبيعة، والتى لها ضغوط صوتية بين 10^3 و10^4 داين لكل سم^2، لكن على الناحية الأخرى، فإنها تستجيب لضغوط صوتية، عند بعض الترددات، تكون صغيرة جدا وتصل إلى 10^{-4} داين لكل سم^2. تولد الضغوط الصوتية الصغيرة جدا هذه إزاحة لطبلة الأذن تكون في حدود 10^{-9} سم لترددات قريبة من 1000 هيرتز. هذه المسافة تكون أقل من جزء من عشرة من قطر جزيء الهيدروجين !

إن آلية السمع تكون أكثر بكثير من الميكروفون البالغ الحساسية. إنها تعمل أيضا كمحلل عالى الحساسية. يمكن رصد (كشف) أصوات بترددات معينة في وجود تداخل من ضوضاء

الخلفية، بمعنى أن آلية السمع تعمل كما لو كانت عبارة عن مجموعة من " المرشحات المتاخمة. الأروع من ذلك هو قدرة النظام السمعي للحكم على مستوى صخابة، درجة (خطوة)، والجودة الموسيقية، وهى الوظائف التي تؤدى باسلوب مشترك بشكل ما مع المخ.

1.13 الخصائص الميكانيكية للأذن

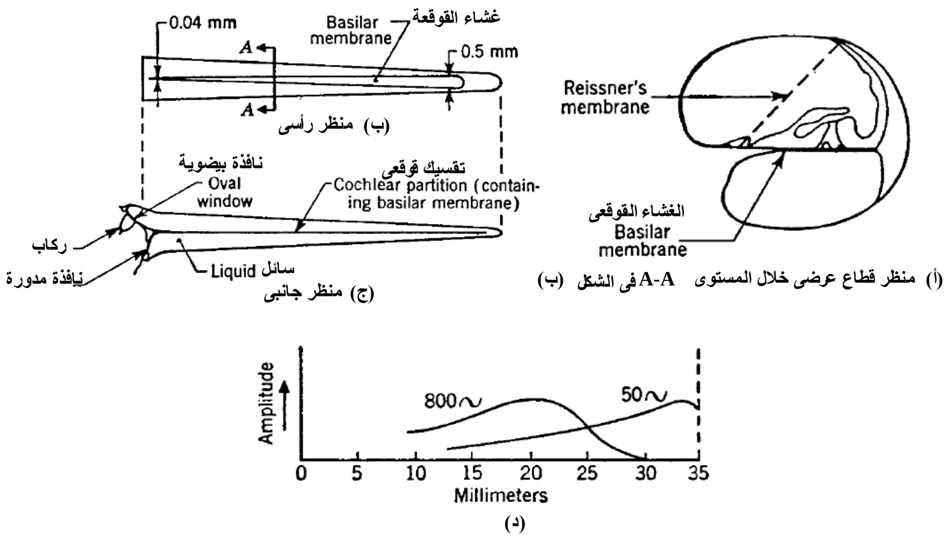
بشكل مبسط، الأذن هى شيء يشبه نوعا ما التمثيل المبين في الشكل 13ـ1. يدخل الصوت خلال القناة السمعية (الأذن الخارجية). لهذه القناة قطر يساوى 0.7 سم وطول 2.7 سم تقريبا. طبلة الأذن عبارة عن غشاء رقيق يوجد عند نهاية هذه القناة ولها مساحة تساوى 0.8 سم^2 تقريبا. توجد ثلاث عظيمات تسمى المطرقة، السندان، والركاب وتوجد ثلاثتها في الأذن الوسطى. تتصل المطرقة مع غشاء الطبلة الرئيسي، بينما يتصل الركاب مع الغشاء الثانى والذي يسمى النافذة البيضوية. تشكل النافذة البيضوية المدخل للأذن الداخلية للمرور الطبيعى للصوت.



الشكل 1.13 رسم للأذن البشرية. تدخل الموجات الصوتية القناة السمعية وتحرك طبلة الأذن، التى تضع العظيمات الثلاثة في حالة حركة. عندما تتحرك النافذة البيضوية فإنها تسبب حركة لسائل شفاف موجود داخل القوقعة، مع حركة ناتجة لغشاء القوقعة.[4]

توجد النافذة البيضوية عندى إحدى نهايات القوقعة. القوقعة عبارة عن عضو مجوف، حلزونى –

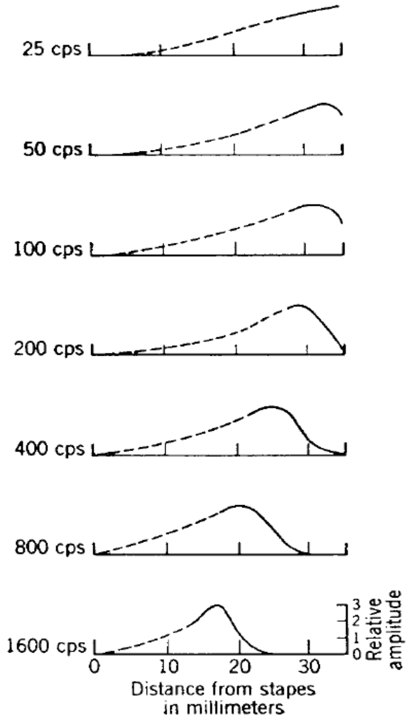
الشكل متكون من العظم ومملوء بسائل شفاف. أنها حلزونية- الشكل لها طول حوالي 35 مم، ومساحة مقطع تساوي حوالي 4 مم^2 عند نهاية الركاب، وتتناقص مساحة المقطع إلى حوالي ربع المساحة الموجودة عند النهاية البعيدة. إنها تنقسم من المنتصف بواسطة حلزون الأذن (أنظر الشكل 13-2(أ) و(ج))، الذي يمتد على طول القوقعة. يكون هذا التقسيم عظمي جزئيا وهلامي جزئيا يسمى الغشاء القوقعي (أنظر الشكل 13-2ب). من المدهش أن نرى أن غشاء القوقعة يكون أصغر عند النهاية الكبير للقوقعة (أنظر الشكل 13-2ب). على سطح غشاء القوقعة يجد ما يقرب من 25 ألف نهاية عصبية للعصب السمعى الرئيسى. الغرفة المملوءة – بالسائل تنقسم بدورها إلى جزئيين بواسطة غشاء رقيق جدا يسمى غشاء ريزنر (Reissner). بالإضافة إلى النافذة البيضوية، التى تتصل مع الغرفة المملوءة – بالسائل فوق تقسيم القوقعة (أنظر الشكل 13-2أ)، توجد نافذة بيضوية التى تتصل مع الغرفة المملوءة – بالسائل السفلية والتى تعمل كمحرر للضغط. تكون مساحة النافذة البيضوية حوالي 3 مم^2 والنافذة المدورة 2 مم^2.



الشكل 2-13 مخططات لمقاطع عرضية، رأسية وجانبية للقوقعة ممدودة للخارج لبيان الفضاءات المملوءة بالسائل فوق وتحت غشاء القوقعة. في الأسفل يوجد منحنى لسعات اهتزاز غشاء القوقعة عند 50 و800 هيرتز.

يكون حجم الهواء المجود في الأذن الوسطى

خوالى 2 سم^3. الفائدة الميكانيكية (نسبة المقاومة إلى القوة المسلطة) لنظام العظمات الثلاثة (العظيمات) في إرسال الاهتزازات من طبلة الأذن إلى النافذة البيضوية يكون حوالي 1.3 إلى 1. لكن، النسبة الفعالة لمساحات طبلة الأذن والنافذة البيضوية مضروبة في هذه الفائدة الميكانيكية تعطى زيادة في ضغط الصوت من الطبلة إلى سائل القوقعة مقدارها 15 مرة تقريبا. هذا التحويل يكون مفيدا لنقل اهتزازات الهواء إلى سائل القوقعة. حركة النافذة البيضوية المتولدة بواسطة حركة الطبلة تبدأ موجة أو أكثر تسافر على امتداد الغشاء وخلال السائل، وتكون النتيجة هى وجود نقطى عظمى للإثارة على الغشاء (أنظر الشكل 13ـ2د).



الشكل 13ـ3 منحنيات السعات النسبية لاهتزاز الغشاء القوقعي عند ترددات منخفضة.[5]

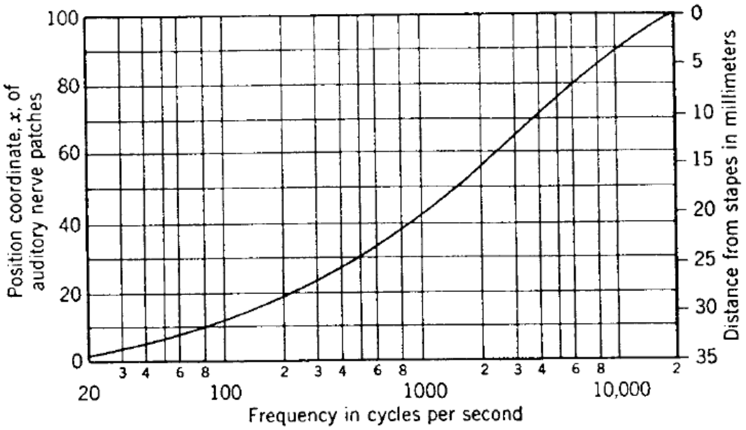
نهاية الغشاء الأقرب إلى النافذة البيضوية تهتز "ترن" عند ترددات أقل. تم استكشاف وبيان طبيعة نمط الاهتزاز في الشكلين 13ـ3 و134. في الشكل 13ـ3 تم بيان قياسات السعة النسبية لحركة الأجزاء المختلفة للغشاء عند سبعة ترددات مختلفة. تعطى هذه البيانات وبيانات أخرى منحنى لمكان أقصى اهتزاز مقابل التردد، كما هو مبين في الشكل 13ـ4. بمعنى أخر، يكون الغشاء القوقعي مرشح ميكانيكي ذات حزمة – عريضة يفصل بشكل الصوت المركب إلى مكوناته. يترتب على ذلك أن تثار مجموعة خاصة من الأعصاب بواسطة تردد معين بشدة أكثر منها بالترددات الأخرى.

من الشكل 13ـ3 يمكن افتراض أن آلية السمع هى بالأحرى نوع سريع (خشن) من المحللات لأن عرض منحنيات الرنين تكون واسعة جدا. لم تتأكد هذا الاستنتاج بالاختبارات الفعلية. على ما

يبدو يضيق النظام العصبي فوق هذا "الرنين".

سنختار بشكل ملائم نموذج رياضي لتوضيح قدرة الأذن على رصد نغمة واحدة في وجود نغمات بنفس الشدة أو بشدة أكبر من الترددات الأخرى. لا يترتب على ذلك إن هذا النموذج الرياضي ينطبق على الحالات الأخرى. إن هذا النموذج يشبه النموذج الذي سوف نستعمله في وصف صفات المرشح الكهربي لفصل مركبة تردد واحد من مجموعة من مثل هذه المركبات. عند وصف المرشحات الكهربية، يكون الحديث عن "عرض الحزم". سوف نفعل نفس الشيء هنا.

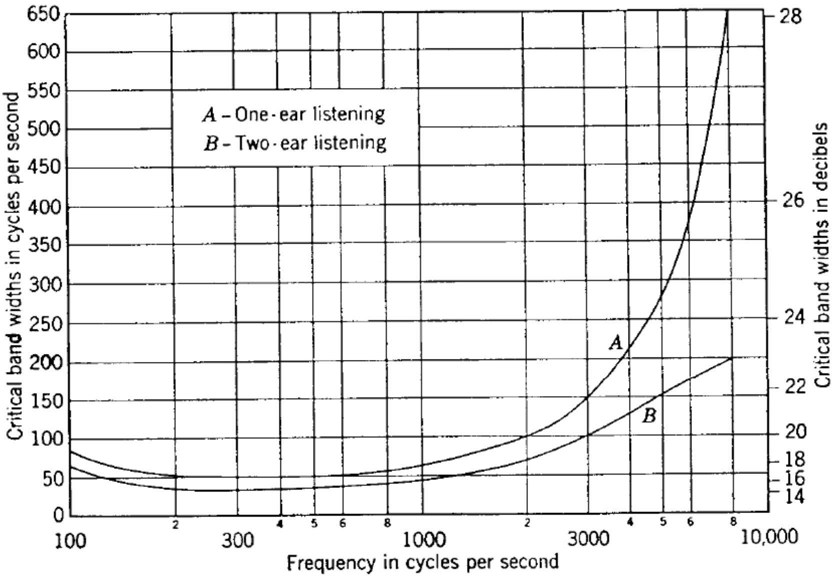
تسمى عرض الحزم لعملية السمع، كما تقاس بواسطة قدرة الشخص على اكتشاف (رصد نغمة نقية في وجود ضوضاء متصلة، عشوائية[6]، بالموجات الحرجة[7]. عند رصد نغمة في وجود ضوضاء، فإن آلية السمع تبدو أنها ترفض الضوضاء خارج حزمة حرجة تتمركز على النغمة النقية، الأمر الذي يجعلها تبدو وكأنها تسلك كوحد مرشح. تظهر عروض الحزم مرسومة كدالة في التردد في الشكل 13ـ5. تختلف عروض الحزم الحرجة لسمع بأذن واحدة اختلافا طفيفا عن نظيرتها لسمع بأذنين إثنين، كما هو مبين في الشكل لكل حالة. في الفصل 13ـ7، سوف نرى كيف أن الشكل 13ـ5 يكون مفيدا في حساب فعالية ضوضاء في حجب نغمة نقية.



الشكل 13ـ4 إحداثيات المكان x لبقع عصب – سمعي على امتداد الغشاء القوقعي عند ترددات مختلفة. تم وضع الصفر الموجود على المحور الموجود على اليسار عند الجزر الأوسع من الغشاء القوقعي كما تم وضع الـ 100 عند الركاب. المسافة (مقاسة من الركاب) لموضع ذروة الاهتزاز أعطيت على المحور الموجود على الجانب الأيمن.[8]

من الشكل 13ـ4 نرى أن منطقة التردد تحت 250 هيرتز تبدو أنها تحتل جزء صغير جدا من

الغشــاء القـوقعي. هذا ســوف يجعل الأصــوات ذات التردد – المنخفض ذات أهمية أقل أو تنفصــل بشـــكل أقل ســـهولة من الأصــوات الموجود مدى التردد – المتوســط. على الرغم من هذا، فإذننا كـم ستمعون، نتمتع بنغمات التردد - المنخفض خ صو صا في مو سيقانا، ويمكننا بـ سهولة أن نكشــف نغمة من آخرى. يوجد دليل على أن التردد – المنخفض يثير تحفيز كل أجزاء الغشــاء القوقعي. من الممكن أيضــا أن ترســل الأصــوات ذات التردد – المنخفض إلى المخ للتحليل بدلا من تحليلها عند الغشاء القوقعي، كما في حالة الأصوات ذات التردد – العالي.



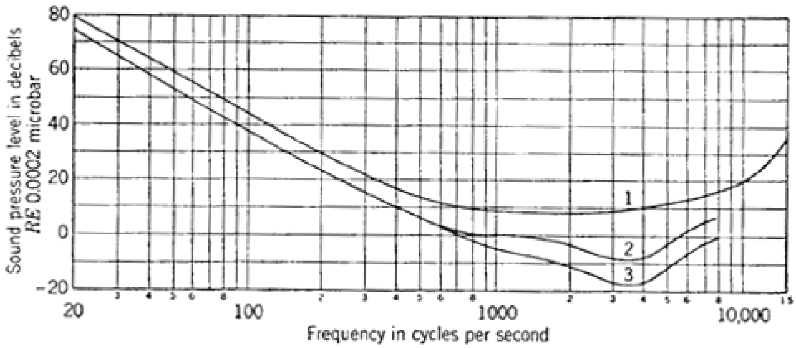
الشكل 5.13 العروض الحرجة لحزم السمع كما هى معينة بواسطة رصد نغمات نقية في وجود ضوضاء عشوائى متصل. (A) سمع بأذن واحدة، (B) سمع بأذنين أثنين. المحور اليسار Δf_c بالهيرتز، والمحور اليمين $10\log_{10}\Delta f_c$ بالديسيبل.[9]

2.13 عتبات السمع Thresholds of hearing

العتبات السماعية Thresholds of audibility

إن العتبات السماعية لإشارة معينة هى أقل ضغط صوتى فعال لهذه الإشارة يكون قادر على إثارة الإحساس سمعي (في غياب أيَ ضوضاء) في الكسر المحدد من الاختبارات. يتم التعبير عنها في العادة بوحدات الديسيبل مع مصدر مرجعى 0.0002 ميكروبار.

إن المعيار الأمريكي للسماعية (للمقدرة على السمع) للنغمات النقية، لمستمع حاد السمع يجلس في غرفة عديمة الصدى ويواجه مصدر للصوت على مسافة أكبر من متر واحد، يكون كما هو مبين بالمنحنى 2 في الشكل 13ـ6. يتم قياس ضغط الصوت قبل أن يدخل المستمع مجال الصوت عند نقطة حيث سيكون مركز الرأس موضوع فيها. يبين المنحنى 1 في الشكل 13ـ6 منحنى مماثل، ماعدا أن الصوت يزود بسماعات أذن ويقاس ضغط الصوت عند مدخل قناة الأذن.



الشكل 13ـ6 عتبات السماعية معينة بثلاثة طرق. (1) منحنى أذن – واحدة، الإشارة مقدمة بسماعة أذن وضغط الصوت مقاس عند مدخل قناة الأذن.[10] (2) منحنى أذنين – اثنتين. إشارة الصوت مقدمة بمصدر منفرد عند مسافة أمام المستمع، وضغط الصوت مقاس في المجال قبل أن يدخله المشاهد.[11] (3) منحنى أذنين – اثنتين. إشارة الصوت مقدمة بعدد من سماعات الصوت الصغيرة موضوعة بشكل عشوائي في مستوى افقي بالقرب من رأس المستمع، وضغط الصوت مقاس في المجال قبل أن يدخله المشاهد.[12]

يمكن رؤية اختلافين هامين بين المنحنيات 1 و2. الأول، هو أنهما مرحلون (مزاحون) من بعضهم البعض بمقدار حوالي 10 ديسيبل، والاختلاف الثاني، أن المنحنى 2 توجد به نتوءات (عدم انتظام) أكثر. تكون الإزاحة النسبية عبارة عن خليط من معاملين إثنين. سوف تزاح عتبة الأذنين ـ الإثنتين إلى أسفل عتبة الأذن ـ الواحدة بحوالي 2 ديسيبل. يعتقد أن الفرق المتبقى من 7 إلى 8 ديسيبل عند الترددات المنخفضة يتسبب بواسطة ضوضاء تتولد تحت سماعة الأذن بالوخز الغير منتظم للعضلات الذي ضده تستقر السماعات. بسبب هذا، في حالة نفس الضغط على طبلة الأذن في كلّ حالة، فإن الصوت المتولد بالسماعة يكون مسموعا عند ضغط 5 إلى 10 ديسيبل أقل من ضغط الصوت المتولد بسماعات الأذن. تكون الفروق الأكبر في المنحنى 2 عند ترددات فوق 800 هيرتز ناتجة عن تشتت الصوت حول الرأس والرنين الصوتى في قناة الأذن – الخارجية. السؤال الذي يطرح نفسه أحيانا هو إلى أى مدى منخفض أو إلى أى مدى مرتفع من التردد يمكن للإنسان

أن يسمعه. بينت الفحوصات أنه يمكن توسيع (مد) المنحنى 1 في الشكل 13ـ6 إلى أسفل لبيان المستوى المطلوب لتوليد سماعية عند 2 هيرتز وأن المستمعين يظهرون سمع عند ذلك مستوى التردد المنخفض. مع ذلك، لاحظ أنه عند 2 هيرتز فإن مستوى ضغط صوت يساوى 135 ديسيبل تقريبا سيكون مطلوبا لتوليد سماعية.

يتغير الحد العلوى للسمع تغير طفيف من شخص لأخر. بشكل عام وجد أن الأشخاص الأصغر عمر يسمعون حتى 20000 هيرتز إذا كانت النغمات حادة بحق. الأشخاص ذات العمر – المتوسط يسمعون عادة حتى 12000 إلى 16000 هيرتز. مرة أخرى، إن المستوى التى تقدم عنده النغمات يكون مهم.

تتغير عتبة السماعية مع العديد من العوامل الكثيرة، والتى تختلف من شخص إلى شخص أخر. حتى لنفس الشخص، فإنها تتغير من يوم ليوم ومن ساعة لساعة أخرى. حتى بعد التعرض إلى مستوى ضوضاء معتدل، مؤقت، حتى لوكان طفيفا، يحدث صمم أيَ يزيح العتبة إلى أعلى.

من العوامل الأساسية التى تؤثر في عتبة السماعية هو العمر. في الشكل 13ـ7 نبين نتائج دراسات لفقد متزايد للحساسية السمعية مع زيادة العمر.[13]

عتبات التحمل

عند النهاية الأخرى لمدى السمع فإننا نهتم بأقصى مستويات للصوت التى يمكن للأذن أن تتحملها بدون مضايقة، دغدغة، أو ألم. تم تسجيل أن المستمعون الذين يلبسون سماعات أذن بأنهم يبدأون المعاناة من المضايقة عندما تصل النغمة النقية (موجة جيبية) لمستويات أكبر من 110 ديسيبل مع مرجع 0.0002 ميكروبار (أنظر الجدول 13ـ1). تثار دغدغة الإحساس في الأذن عند المستويات الأكبر من 130 ديسيبل. من الممكن أن حدث ألم مؤكد عند تتجاوز المستويات 140 ديسيبل. يبدو أن هذه القيم تكون مستقلة تقريبا عن التردد في المدى بين 50 و8000 هيرتز. إن المستمعين الذين يتعرضون لمستويات عالية يوميا يمكن أن يتحملوا حوالى 10 ديسيبل أعلى في فئتين أو ثلاثة من الفئات المدونة في الجدول 13ـ1. تم تسجيل نتائج مشابهة لضوضاء لها طيف متصل، مثل الضوضاء البيضاء (التى لها طيف متصل) أو الضوضاء العشوائية. لكن، في حالة الطيف المتصل

ذات الحزمة – العريضة، تصل العتبة عندما تبلغ الطاقة في أى من عرض الحزم الحرجة عند بعض النقط على امتداد تدريج التردد المستويات المعطاة في الفقرة السابقة.

الجدول 1.13 عتبة التحمل. (تم تزويد الصوت بواسطة سماعة أذن، والتردد بين 50 و8000 هيرتز).

العتبة	نغمات نقية	
	أذان بسيطة	أذان متعرضة
عدم راحة	110	120
دغدغة	132	140
ألم	140	
تلف فورى............................	من 150 إلى 160	

3.13 الخطوة (الدرجة، Pitch)

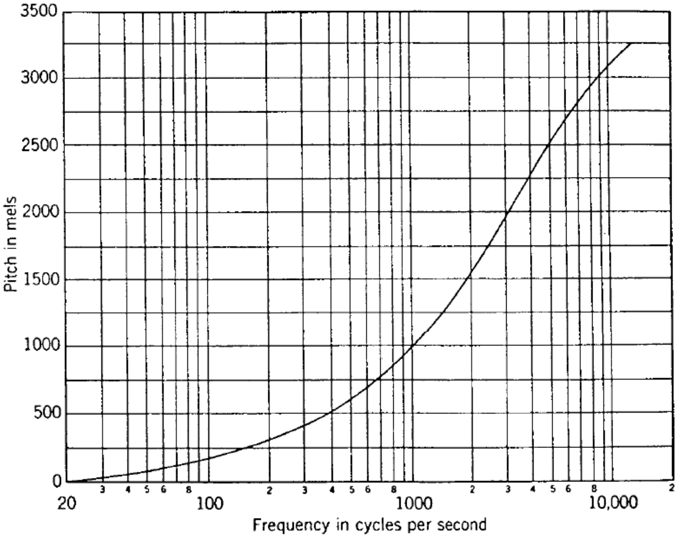
تعرف الخطوة بأنها سمة للإحساس السمعي من حيث ترتيب أيّ أصوات على مقياس يمتد من "المستوى المنخفض" إلى " المستوى العالي "، مثل التدريج الموسيقي. الدرجة كمية شخصية. إنها بصورة رئيسية دالة في تردد الصوت، لكنها أيضا تعتمد على مستوى ضغط الصوت والتركيب. وحدة الخطوة هى المل (Mel).

التردد هو كمية فيزيائية تقاس بجهاز فيزيائى، ووحدته دورة في الثانية أو الهيرتز. إن نغمتين لهما نفس التردد، لكن لهما مستويات ضغوط صوت مختلفة، سوف تصوتان بخطوة مختلفة. بمعنى أخر، سوف تصوت النغمة 200 هيرتز عند مستوى معين كما لو كانت لها تردد يختلف عن 200 هيرتز عند مستوى أخر. نجد ايضا أن المستمع لا يعتبر في العادة أوكتاف في التردد كمضاعفة للخطوة.

لقياس الخطوة، نبنى تجربة نعطى للمشاهد فيها مولدين نغمات (مذبذبين) منفصلين. يتم ترتيب هذه المولدات بحيث يمكن توصليهما بالتتابع إلى سماعة صوتية أو إلى سماعات أذن. يطلب من المشاهد أن يقوم بضبط تردد أحد المولدات حتى يبدو أن يكون ضعف خطوة المولد الأخر. يتم تكرار هذه الطريقة لعدد من الأوضاع لمذبذب مرجعى تمتد على مدى من الترددات. يتم سؤال المشاهد أيضا أن يزيد أو ينقص الخطوة بعوامل أخرى. من هذه البيانات، يتم عمل تدريج خطوة بوحدات المل. تم اختيار خطوة 1000 مل كخطوة لنغمة 1000 هيرتز مع مستوى ضغط صوت 60

ديسيبل مع مرجع 0.0002 ميكروبار. يبين الشكل 13ـ8 منحنى كامل للخطوة مقابل التردد.

السمة الشيقة للمنحنى المبين في الشكل 13ـ8 هى أن شكل المنحنى يقارب جدا شكل المنحنى المبين في الشكل 13ـ4. هذا التشابه يدعونا للاعتقاد أن تعيين الخطوة هو الحكم الذي يستند على موقع نقطة الإثارة على طول غشاء القوقعة.



الشكل 13ـ8 العلاقة بين خطوة شخصية معبر عنها بالمل والتردد. لاحظ أن الخطوة الشخصية تزداد تصاعديا وبشكل مفاجئ مع الزيادة اللوغاريتمية للتردد. التدريج الموسيقى، بالمقارنة، يكون تدريج لوغاريتمى، بمعنى أخر، الأوكتاف هو مضاعفة التردد.[14]

في الختام، يجب أن نلاحظ أننا نعلم القليل جدا عن خطوة الأصوات المركبة وتوجد بعض المتناقضات المثيرة، كما سوف نرى في الفصل 13ـ6.

13ـ4 مستويات الصخب والصخب.

مستويات الصخب (Loudness Levels)

عندما نسمع صوت، فإننا في العادة نحكم على " صخابته " (مدى ارتفاعه). على سبيل المثال، نقول أن صوت الرعد "عالي جدا "، بينما يكون غناء شخص موجود على مسافة" ليس عالي جدا ". إن هذه التعابير الكمية: " العالي جدا "، " الأقل "علوا، أو " الناعم" قد تم وضعها كوصف كمي

لبعض أنواع الأصوات.

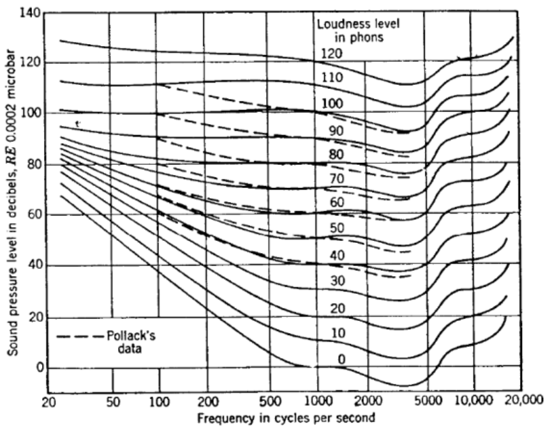
إن أبسط طريقة للتخاطب الكمى عن صخابة الصوت هى مقارنته مع بعض الأصوات القياسية. تم اختيار هذا الصوت القياس ليكون عبارة عن نغمة 1000 هيرتز. إن مستوى صخابة الصوت يعرف على أنها مستوى ضغط الصوت لنغمة 1000 هيرتز تصوت بصخابة مثل الصوت موضع السؤال. تقاس مستوى الصخابة بوحدة تسمى الفون (phon). على سبيل المثال، إذا صوتت نغمة 1000 هيرتز بمستوى ضغط صوت 70 ديسيبل مع مرجع 0.0002 ميكروبار بصخابة مثل موجة مربعة معينة (بغض النظر عن مستوى ضغط صوت الموجة المربعة)، فإنه يقال أن للموجة المربعة مستوى صخابة يساوى 70 فون.

تم عمل قياسات كثيرة لتعيين مستويات صخابة لنغمات نقية وحزم – رفيعة من الضوضاء كدالة في تردد ومستويات ضغط الصوت. تم عرض هذه النتائج في الشكلين 13ـ9 و13ـ10. تم إعطاء مستوى ضغط الصوت للصوت على كل من المنحنيات. الأعداد التى تظهر على كنتورات هى مستويات الصخابة للصوت وتكون مستويات ضغط الصوت لنغمة 1000 هيرتز التى تتساوى معها في الصخابة. تم إعطاء ثلاثة مجموعات من المنحنيات في الشكلين، وهى تلك المبينة بالمنحنيات المنقطة المكررة مرتين. أول هذه المنحنيات الثلاثة (الخطوط المتصلة في الشكل 13ـ9) هى المجموعة القياسية الأمريكية للصخابة لنغمات نقية ولمراقبين ينصتون في غرفة عديمة الصدى لمصدر صوت موضوع عند مكان يبعد مسافة أكثر من متر واحد عن المستمع. تسمى هذه الكنتورات في العادة بكنتورات فلتشر – مانسون (Fletcher - Munson). قيست مستويات ضغط الصوت للنغمات بواسطة مستمع خارج مجال الصوت عند نقطة تقابل مركز رأسه.

المجموعة الثانية من المنحنيات (الخطوط المتصلة في الشكل 13ـ10) هى أيضا لنغمات نقية للبيانات المأخوذة في إنجلترا تحت ظروف مماثلة لتلك الموجودة في الشكل 13ـ9. تسمى هذه الكنتورات بكنتورات شارشير ـ كنج (Churcher-King). بشكل عام ليس من غير المعروف إذا ما كانت منحنيات الشكل 13ـ9 أو منحنات الشكل 13ـ10 أكثر مثالية في هذا البلد، في الوقت الحاضر، نستخدم بشكل عام مجموعة المنحنيات الموصى بها من قبل جمعية المعايير الأمريكية.

مجموعة المنحنيات الثالثة (الخطوط المنقطة في الشكلين 13-9 و13-10) هى لحزم من الضوضاء، عرضها 250 مل (أنظر الفصل 13-3 الخطوة)، ومزودة بواسطة سماعة أذن. تم قياس مستويات ضغط الصوت بالكاد تحت غطاء سماعة أذن التى تجهز الصوت. إن هذه المخططات تشبه في الشكل كنتورات شارشير – كنج.

إن منحنيات تساوى – الصخابة تكون مهمة بوجه خاص في تصميم أجهزة استقبال الراديو. في قاعات الحفلات الموسيقية، تعزف الموسيقى عادة بمستويات مرتفعة نسيبا. عند إعادة توليد هذه الموسيقى في منازلنا بواسطة راديو أو فونوغراف، فإننا نستمع لها في الغالب عند مستويات مختزلة بشكل كبير. وبما أن الأذن تميز الصوت بشكل ترددى للنغمات ذات التردد – المنخفض عندما تكون المستويات منخفضة، كما يمكن ان نرى من منحنيات تساوى – الصخابة، فإن الموسيقى تبدو كأنها فقدت جودة التمييز الترددى لها. لكي يتم إعطاء الوهم بأن الموسيقى يعاد إنتاجها بنفس المحتوى النغمي كما في القاعة الموسيقية، يركب مصممين الراديو شبكات تعوض تغير استجابة النظام السمعي في الراديو آليا عند ضبط مفتاح تحكم الصوت، بشكل معاكس للأسلوب الذي تغير به الأذن استجاباتها مع تغير مستوى الإشارة. يسمى مثل هذا التعويض وزن التردد (weighting frequency)، ويسمى الجهاز الكهربى الذي يعدل استجابة التردد بشبكة تعديل إفرازات (weighting network) أو تحكم النغمة (tone control).

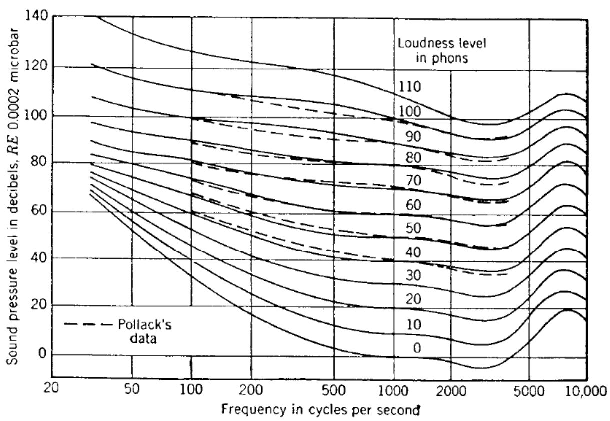


الشكل 13-9 مخططات (كنتورات) تساوى – الصخابة لنغمات نقية بواسطة فلتشر ومانسون. [15]
الخطوط المنقطة هى مخططات تساوى – الصخابة لحزم من الضوضاء ذات عرض 250مل (Mel) كما هى معينة بواسطة بولاك. [16]

الصخابة (Loudness)

إن مفهوم مستوى الصخابة، الذي تعلمناه توا، يكون مفيد جدا، لكنه لا يعطي القصة الكاملة. من مخططات مستوى الصخابة في الأشكال 13ـ9 و13ـ10 لا يمكننا القول كم يكون أحد الأصوات أصخب (أعلى) من صوت آخر. على سبيل المثال، هل يكون الصوت الذي له مستوى صخابة 100 ديسيبل أعلى مرتين، ثلاثة مرات، أم أربعة مرات من صوت له مستوى صخابة 80 ديسيبل؟ للإجابة على هذا السؤال يجب عمل عدة مجموعات شاملة من القياسات لتعيين تدريج الصخابة. لكن دعنا أولا نعرف الصخابة.

تعرف الصخابة بأنها الخاصية المركزة للإحساس السمعي، التى بدلالتها يمكن ترتيب أيّ أصوات على التدريج الممتد من "ناعم" إلى " عالي". تكون الصخابة دالة في ضغط الصوت أساسا، لكنها تعتمد أيضا على التردد وشكل الموجة. وحدة الصخابة هى وحدة الصون (sone). من التعريف، تولد النغمة النقية 1000 هيرتز، فوق عتبة المستمع الطبيعى بـ 40 ديسيبل صخابة مقدارها 1 صون. في القياسات التى أدت إلى تدريج الصخابة، طلب تغيير الصخابة بمعاملات 2، 10، 0.5، و0.1 . من هذه البيانات يمكن بناء منحنى الصخابة مقابل مستوى الصخابة، كما هو مبين في الشكل 13ـ11.



الشكل 13ـ10 مخططات (كنتورات) تساوى – الصخابة لنغمات نقية بواسطة شارشير وكنج. [17]
المنحنيات المنقطة هى كما هى مثل الشكل 13ـ9.

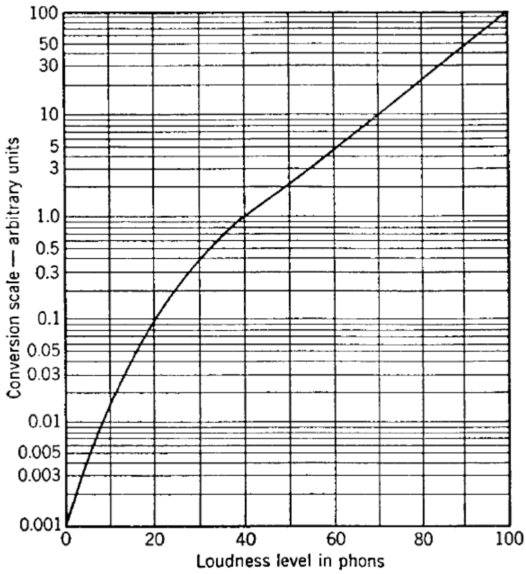
نرى من الشكل 13ـ11 أن، بالنسبة لمستويات ضغط الصوت الأعلى، فإن 10 ديسيبل في مستوى

الصخابة يقابل بالتقريب مضاعفة للصخابة بالصون. عند المستويات الأقل، فإن 10 ديسيبل تقابل تغير في الصخابة يبلغ معامل يساوى 3 تقريبا.

مؤخرا تم وضع هذا المنحنى تحت المراجعة من قبل مجربين مختلفين، ويوجد دليل جيد بانه يجب أن يكون له ميل أصغر. لكن، من المفهوم جيدا أن هذا المنحنى يكون مفيدا في تعيين مستوى صخابة الصوت المركب بمعرفة مستوى صخابة مكوناته أو مستوى الطيف. لذا، فإننا سنسمى المنحنى الموجود في الشكل 13ـ11 بدالة التحويل (transfer function).

حساب مستوى الصخابة لمجموعة من النغمات النقية

تمدنا بيانات الأشكال 13ـ9 إلى 13ـ11 بمعلومات يمكن منها تقدير مستوى الصخابة لمجموعة من النغمات النقية إذا علمنا مستوى ضغط الصوت لكل منها. تكون الطريقة بسيطة إذا كان تقارب النغمات من بعضا البعض لا يقل بمقدار 450 مل (أنظر الشكل 13ـ8 للعلاقة بين التردد والمل). إذا كانت الترددات متقاربة بمقدار أقل من 450 مل لكل منها، فإن شداتها الموزونة يجي أن تضاف ويعالج المجموع كنغمة واحدة نقية، كما سوف نصف الأن.[18]



الشكل 13ـ11 رسم دالة التحويل (الصخابة بالصون) كدالة في الصخابة بالفون. مستوى الصخابة لصوت معين يساوى مستوى ضغط الصوت لنغمة 1000 هيرتز تعطى صوت مساوى في الصخب. تم افتراض أن الأصوات تقدم لأذن غير مغطاة.[15]

في حالة مجموعة مكونة من N من النغمات، فإن خمس خطوات تكون ضرورية لحساب مستوى الصخابة المجمع :-

1- نقسم النغمات N طبقا للتردد إلى عدد من المجموعات يتراوح من 7 إلى 10 مجموعات، ويفضل أن يكون لكل مجموعة حدود التردد المدونة في الجدول 13ـ2(يمكن استخدام ثمانية حزم أوكتاف – تردد بدلا من 10 كما هو مدون)، ثم نعين مستوى ج م م ضغط الصوت الموزون لكل مجموعة. المقصود بمستوى ضغط الصوت "الموزون" هو أن كل النغمات تكون محولة إلى منتصف تردد الحزمة بمساعدة كنتورات تساوى – الصخابة. افترض أن لدينا نغمتين 100 و200 هيرتز لهما ضغط صوت يساوى 60 و50 ديسيبل على الترتيب. حينئذ، من الشكل 13ـ9، نرى أن النغمة 100 هيرتز بضغط 60 ديسيبل تكافئ في الصخابة للنغمة 150 هيرتز بضغط 55 ديسيبل وأن النغمة 200 هيرتز بضغط 50 ديسيبل تكافئ في الصخابة للنغمة 150 هيرتز بضغط 55 ديسيبل. إن اتحاد المستويين 55 ديسيبل على أساس الطاقة يعطى مستوى نغمة – مكافئة لـ 58 ديسيبل.

2- يتم تعيين مستوى الصخابة لكل من المجموعات العشرة من الشكل 13ـ9.

3- يتم تحويل كل مستوى من مستويات الصخابة بالفون إلى أرقام تحويل (transfer numbers) بمساعدة الشكل 13ـ11.

4- يتم إضافة العشرة أرقام التحويل معا للحصول على رقم التحويل الكلى.

5- يتم تحويل رقم التحويل الكلى إلى مستوى الصخابة المطلوب بالفون بمساعدة الشكل 13ـ11.

على سبيل المثال، افترض أن لدينا أربعة نغمات في مجال حر كما يلى: نغمة 100 هيرتز ومستوى ضغط صوت 47 ديسيبل، نغمة 180 هيرتز ومستوى ضغط صوت 35 ديسيبل، نغمة 600 هيرتز ومستوى ضغط صوت 40 ديسيبل، ونغمة 3000 هيرتز ومستوى ضغط صوت 30 ديسيبل. تقع هذه النغمات في ثلاثة حزم، للحزمة الأدنى مستوى ضغط صوت موزون 44 ديسيبل. من الشكل

9ـ13 نرى أن مستويات الصخابة تكون 20 فون، 38 فون، 33 فون على الترتيب. تتعين أرقام التحويل من الشكل 11ـ13 وتكون 0.09، 0. 95، و0.55 على الترتيب. بجمع هذه الأرقام تعطى رقم تحويل كلى يساوى 1.70. من الشكل 11ـ13 نرى أن هذا يقابل مستوى صخابة 46 فون.

الجدول 2ـ13 حزم التردد لـ 300 مل متساوية العرض.

رقم الحزمة	حدود الخطوة بالمل	الخطوة المتوسطة بالمل	حدود التردد بالهيرتز	تردد الخطوة المتوسطة بالهيرتز
1	300ـ0	150	200ـ20	94
2	600ـ300	450	500ـ200	340
3	900ـ600	750	860ـ500	670
4	1200ـ900	1050	1330ـ860	1080
5	1500ـ1200	1350	1900ـ1330	1600
6	1800ـ1500	1650	2570ـ1900	2230
7	2100ـ1800	1950	3450ـ2570	2960
8	2400ـ2100	2250	4660ـ3450	4000
9	2700ـ2400	2500	6300ـ4660	5400
10	3000ـ2700	2850	9000ـ6300	7500

حساب مستوى الصخابة لأطياف الضوضاء المتصلة

يمكن حساب مستوى الصخابة لأطياف الضوضاء المتصلة بطريقة مماثلة للطريقة الموضحة في الفصل السابق. في هذه الحالة، يتم تحليل الضوضاء أولا إلى مستويات ضغط صوت بواسطة سلسلة متجاورة من مرشحات تمرير – الحزمة مثل العشرة المدونة في الجدول 2ـ13. بعد ذلك يتم معالجة كل المستوى في كل حزمة كما لو كان مستوى نغمة نقية لها تردد يقع عند تردد الخطوة – المتوسطة للحزمة. يتم إتباع نفس طريقة حساب مستوى صخابة مجموعة من النغمات النقية (أنظر الخطوات 2 إلى 5 من الفقرة السابقة)

5ـ13 الحساسية التفاضلية لضغط الصوت والتردد

أدنى تغييرات محسوسة في مستوى ضغط الصوت

يكون الشخص قادرا على كشف تغير في مستوى ضغط صوت مقداره 1 ديسيبل تقريبا من أى نغمة بين 50 و10000 هيرتز إذا كان مستوى النغمة أكبر من 50 ديسيبل فوق عتبة هذه النغمة. تحت ظروف مختبر إسماع مثالية، مع إشارات مزودة بواسطة سماعة أذن، فإنه يمكن

كشف تغيرات صغيرة في المستوى تصل 0.3 ديسيبل بواسطة الأذن في مدى الترددات – المتوسطة. في حالة مستويات ضغط الصوت الأقل من 40 ديسيبل، فإن التغيرات من 1 إلى 3 ديسيبل تكون ضرورية لكي تكون محسوسة.

أدنى تغييرات محسوسة في مستوى ضغط الصوت

في حالة ترددات فوق 1000 هيرتز ومستويات ضغط أعلى من 40 ديسيبل، فإن أقل تغير محسوس في التردد يمكن للأذن أن ترصده يكون في حدود 0.3 ٪ (أنظر المرجع 2 في الباب الثالث). عند التردد أسفل 1000 هيرتز ونفس مدى مستويات الضغط، فإن الأذن يمكن أن تكشف تغيرات في التردد صغيرة تصل إلى 3 ديسيبل. عند مستويات الضغط المنخفضة وخاصة عند ترددات منخفضة فإن أقل تغير محسوس في التردد ربما يكون أضعاف هذه القيم.

6.13 حالة غياب الأساسى The case of missing fundamental

التشوه التوافقى عند الترددات الأقل في جهاز استقبال راديو صغير أو في سماعة ربما يكون له تأثيرات مفيدة. لأنه يكون مستحيلا أن تشع نسبة مئوية كبيرة من القدرة المتاحة من سماعة صغيرة عند ترددات منخفضة، فإنه يكون من الصعب على أحد ما فهم لماذا تصدر بعض أجهزة الراديو والسماعات الصغيرة الصوت بشكل جيد جدا. أحد الأسباب هو أن

أحد الأسباب بأن مدونات الباز (المعتمدة على التمييز الترددى) تزود في الحقيقة أما بشكل فسيولوجي أو بشكل نفسي لأن الكثير من التوافقيات لها تكون موجودة في الإشارة. من الواضح إن خطوة الترددات المتتابعة مثل 400، 600، و800 هيرتز هى نغمة الـ 200 هيرتز. لكن، إذا أضفنا الترددات 500 و700 هيرتز فإن الخطوة سوف تنخفض إلى النغمة 100 هيرتز. إن الخطوة المحسوسة لمجموعة النغمات المتساوية التباعد في تردد لا تكون في العادة عبارة عن التردد المتوسط للمجموعة، لكن بدلاً منه تكون عبارة عن الفرق الثابت في التردد بين النغمات.

حتى عندما تحذف كل ترددات جملة موسيقية التى تكون أسفل قيمة معينة، 300 هيرتز مثلا، فإن جودة الجملة الموسيقية تبقى كما هى بدرجة مدهشة. يحدث هذا حتى بدون تشوه توافقى في نظام إعادة إنتاج –الصوت لأن معظم الموسيقى تكون غنية نسبيا بالمحتوى التوافقى، لكن

يكون هذا حقيقى خصوصا إذا تم توليد الكمية الصحيحة من التشوه التوافقى عند الترددات الأقل.

7.13 الحجب Masking

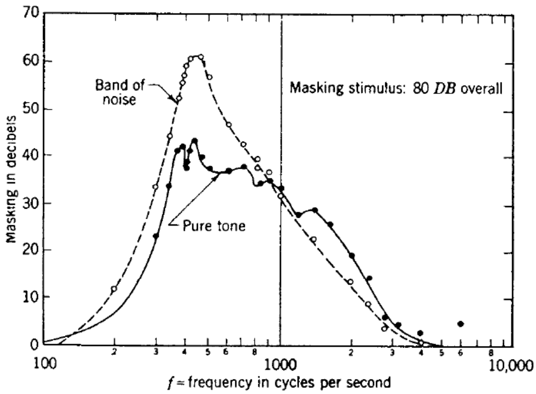
في أغلب الأحيان، يتساءل مهندس الصوت، إلى أى مستوى أحتاج إلى تخفيض النغمة حتى تصبح غير مسموعة في وجود ضوضاء الخلفية؟ على سبيل المثال، في السيارات، يمكن أن تبعث نغمة من سماعة راديو السيارة عند تردد الهزاز في مصدر القدرة. قد يكون من غير الاقتصادي إزالة هذه النغمة بالكامل، لكن ربما يكون من المعقول تخفيضها حتى تضيع في الضوضاء العامة داخل السيارة. لتأسيس المستوى المحتمل لهذه النغمة، فإننا نحتاج إلى معرفة إلى أي مدى يحجب أو يغطى صوت ما صوت أخر.

كميا، نعرف مصطلح الحجب كعدد الديسيبلات الذي ترتفع (تتغير) به عتبة السماعية للمستمع في حضور (اختفاء) صوت أخر. على سبيل المثال، دعنا نفترض أن لدينا نغمة لها تردد 1500 هيرتز. دعنا نفترض أنه يمكن سماع هذه النغمة حتى يصبح مستواها أقل من $+1$ db re 0.0002 microbar. بمعنى أن عتبة السماعية لهذه النغمة هى +1 ديسيبل. بعد ذلك، دعنا نقوم بتشغيل نغمة ثانية 1200 هيرتز ومستوى 80 ديسيبل، مثلا. الأن نجد أن النغمة الأولى (1500 هيرتز) لا تكون مسموعة حتى يتم زيادة مستواها حتى 54 ديسيبل. في هذه الحالة، فإننا نقول أن حجب النغمة الثانية بواسطة النغمة الأولى هو 54 ديسيبل ناقص 1 ديسيبل، أى يساوى 53 ديسيبل.

يكون تأثير الحجب دائما قبل تردد النغمة أكبر منه بعد التردد. على سبيل المثال، يكون لحجب نغمة نقية ذات تردد f المتولد بواسطة حزمة رفيعة من الضوضاء أو بواسطة نغمة نقية 400 هيرتز مع ج م م ضغط صوت يساوى 80 ديسيبل القيم المبينة في الشكل 13ـ12. تحدث ضربات في الصوت المحسوس أينما كانت ترددات النغمتين مقتربة من بعضهما البعض.

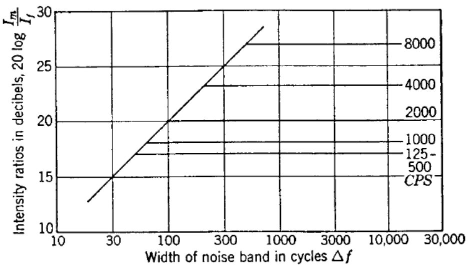
عندما يكون للضوضاء طيف متصل بدون قمم أو منخفضات كبيرة، فإن تأثير الحجب على نغمة نقية يمكن أن يتعين بواسطة الشكل 13ـ12. بالنسبة لهذه الحالة، فإن الضوضاء في حزمة التردد الرفيعة على جانبى النغمة النقية تعمل على حجب النغمة. بمعنى أخر، تعمل

خصائص الأذن التي تجعلها تؤدي مثل المرشح. دعنا نلقى مزيد من الضوء على تفسير هذه الحقيقة. عند التعبير عن مستوى الضوضاء بدلالة مستوى طيفها، بمعنى، ج م م مستويات ضغط الصوت في حزم عرض كل منها 1 هيرتز، فإن النغمة النقية يجب أن يكون لها مستوى أكبر من مستوى طيف الضوضاء بعدد الديسيبلات المبين في الشكل 13ـ5. بأسلوب أخر، يجب أن يزيد مستوى النغمة النقية قليلا عن ج م م المستوى الكلى للضوضاء في عرض الحزمة الحرج لكى يمكن سمع النغمة. تم بيان عروض الحزمة الحرجة Δf_c بالهيرتز وبالديسيبل ($10 \log_{10} \Delta f_c$) على المحورين الرأسيين للشكل 13ـ5.



الشكل 13ـ12 حجب متولد بمحفزين، أحدهما نغمة عند 400 هيرتز والأخر عبارة عن حزمة رفيعة من الضوضاء تتمركز عند 410 هيرتز كدالة في تردد النغمة التى ستحجب.[7]

يمكن إيضاح معنى عرض الحزمة الحرج بشكل أبعد بالرجوع إلى الشكل 13ـ13. دعنا نفترض أن لدينا نغمة نقية لها تردد ما وأن الضوضاء ذات الطيف – المتصل لها طيف مسطح يمتد تردده من f_a إلى f_b هيرتز. أيضا، دعنا نفترض أن عرض حزمة هذه الضوضاء ($\Delta f = f_b - f_a$) يتغير على مدى واسع يتمركز حول تردد النغمة النقية. عندما يكون عرض الحزمة صفرا، فإنه بوضوح سيكون الحجب صفرا. مع زيادة عرض الحزمة، فإن الحجب M بالديسيبل يزداد في تناسب طردى مع لوغاريتم عرض الحزمة حتى قيمته الحرجة Δf_c. فوق هذا العرض لا يحدث حجب إضافي للنغمة النقية. لذلك، عندما يستمع الشخص إلى إشارة نغمة – نقية في حضور ضوضاء خلفية، فإنه لا فائدة تكتسب من استعمال المرشح لإزالة ضوضاء الخلفية، مالم يكون عرضها أقل من عرضها الحرج.



الشكل 13ـ13 نسبة النغمة المحجوبة I_m إلى الشدة لكل دورة للضوضاء I_f مرسومة مقابل عرض حزمة الضوضاء Δf بالدورة.[19]

الجزء الحادى والثلاثون - وضوح الخاطب

إن موضوع التخاطب (الكلام) موضوع كبير جدا ولا يمكن معالجته هنا، لكن سنقدم بعض من الخواص البسيطة للإشارات وطريقة الحديث لتقدير الوضوح المقطعي. للمزيد من القراءة في هذا الموضوع نشير إلى المراجع 1، 3، 20ـ25.

8ـ13 طيف التخاطب

التخاطب هو تعاقب النطق الذي يولد موجة تتغير تردداتها وسعاتها بسرعة مع الوقت. لقد بينا بالفعل في الجزء السادس والعشرين أن للصوت البشرى، في المتوسط، طيف قدرة له قمة (للذكور) عند 500 هيرتز تقريبا وطيف (في حزم الأوكتاف) تهبط قبل الـ 1000 هيرتز بمعدل 8 ديسيبل/أوكتاف تقريبا. بيننا أيضا أنه عند الترددات العالية يكون الصوت موجها.

يدوم كل مقطع حديث حوالى $\frac{1}{8}$ ثانية، والفترة المتوسطة بين المقاطع تكون حوالي 0.1 من الثانية. بعض الأصوات، أحرف العلة (في الإنجليزية) على سبيل المثال، تتولد من الأحبال الصوتية. تتولد باقى الأحرف بواسطة ضوضاء حركة الهواء خلال الفم وفوق اللسان والشفاه. يتشكل طيف التردد لكلا النوعين من الأحرف بواسطة تجاويف رنانة متكونة بواسطة الزور، الفم، الأسنان، والشفاه.

لا تكون أصوات أحرف العلة حاسمة الوضوح كالأصوات الساكنة. من سوء الحظ أن الأصوات الساكنة تكون ضعيفة جدا، لذلك، تخفي (تحجب) بسهولة بالضوضاء. في بعض اللغات، مثل

العبرية، لا توجد أحرف علة مكتوبة، بل أحرف ساكنة فقط.

عند رسم طيف تخاطب متوسط زمن – طويل بدلالة مستوى طيفه (ج م م الضغط في حزم 1ـ هيرتز) كما قيست أمام المتحدث على مسافة متر واحد، كما يظهر في الشكل 13ـ14 بالمنحنى المسمى " المستوى المتوسط للتخاطب ". بينت الاختبارات المسجلة بواسطة فرينش وستينبيرج[22] وبيرانيك [23] أن المدى الديناميكى المفيد للتخاطب في كل حزمة تردد يبدو أنه 30 ديسيبل. لهذا العدد، يقع ج م م القمم 12 ديسيبل تقريبا فوق المستوى المتوسط، والمقاطع الأضعف تفع تقريبا 18 ديسيبل تحت المستوى المتوسط.

9.13 تقدير وضوح التخاطب

في محاولة تقدير وضوح التخاطب يجب علينا أيضا أخذ خصائص آلية السمع في الاعتبار. بينت الاختبارات المسجلة بواسطة فرينش وستينبيرج[22] أن تدريج التردد المناسب المستخدم كقاعدة للحسابات هو المقياس الذي يتناسب مع تدريج الخطوة الذي تم مناقشته في الجزء السابق. يجب أيضا أن ندخل في الحسابات، عتبة السمع ونقطة "الحمل الزائد" لآلية السمع المتوسطة. نقصد بنقطة الحمل الزائد المستوى عند كل تردد الذي فوقه لا تستجيب آلية السمع للمحفزات.

دليل الوضوح الصوت (تمفصل الكلمات articulation index

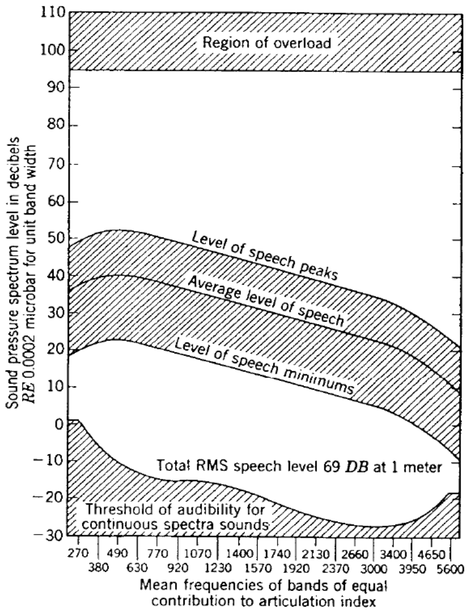
تشترك كل هذه العوامل في منحنى واحد كما هو مبين في الشكل 13ـ14. يكون المحور الأفقى في هذا الشكل عبارة عن التردد بالهيرتز، مرسوم على التدريج المعين بشكل تجريبي بواسطة فرينش وستينبيرج[21]. على هذا المنحنى تم رسم الكميات التالية كمستويات طيف (أنظر الجزء 2) :ـ 1ـ عتبة السمع لأصوات طيف – متصل. 2ـ المستويات العظمى، المتوسطة، والدنيا للتخاطب لصوت رجالي متزايد مقاس عند مسافة 1 متر أمامه مباشرة، و3ـ " مستوى طيف التحميل الزائد " للأذن.

طبقا للدراسة التى قام بها فرينش وستينبيرج وبيرانيك، إذا كانت مستويات طيف التخاطب في أذن مستمع بحيث يقع مركز المنطقة المظللة في الشكل 13ـ14 فوق عتبة السمع للمستمع وفوق ضوضاء الوسط المحيط، لكن تقع تحت خط الحمل الزائد، فإن كل مقاطع الحديث

ستكون مسموعة بالنسبة إلى المستمع وسيكون وضوح الحديث مثالي تقريبا. إن هذا يقابل دليل وضوح الصوت 100 ٪.

على الجانب الأخر، إذا كانت الضوضاء تغطي جزء من منطقة التخاطب المظللة أو إذا وقع جزء من المنطقة تحت عتبة السمع أو فوق مستوى التحميل الزائد لآلية السمع، فإن دليل الوضوح الصوت يكون أقل من الواحد الصحيح.

تعرف النسبة المئوية لدليل وضوح الصوت على أنها النسبة (مضروبة في 100) بين مساحة منطقة التخاطب غير المغطاة بالبنود المذكورة في الجملة السابقة ومنطقة التخاطب الكلية كما هو مبين في مركز الشكل 14ـ13.



الشكل 14ـ13 رسم، على أساس مستوى الطيف، لـ(1) مساحة التخاطب لرجل يتحدث بشكل متزايد، (2) منطقة" الحمل الزائد" للأذن لمستمع ذكر متوسط، و(3) عتبة السماعية لأذن شابة. رسمت كل المنحنيات كدالة في التردد على تدريج تردد مشوه.[23]

طريقة حساب دليل وضوح الصوت

لحساب وضوح الصوت في حالة معينة، يجب إتباع الخطوات التالية:ـ

1ـ يجب تعيين الكسب الأورثوتليفونك (الهاتفي الصحيح، orthotelephonic) للنظام كدالة في التردد. يعرف الكسب الأورثوتليفونك بالعلاقة التالية،

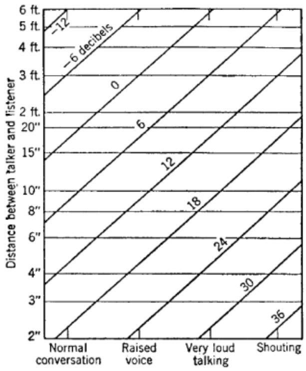
$$\text{orthotelephonic gain} = 20\log10\ \frac{p_2}{p_1} \qquad 13\text{-}1 \text{ سلطان}$$

حيث p_1 ضغط الصوت المتوسط على زمن – طويل المتولد عند أذن المستمع بواسطة متحدث

ذكر متوسط على بعد 1 متر في حجرة عديمة الصدى، يستخدم المتحدث صوت متزايد (6 ديسيبل فوق الصوت العادى). هذه هى الحالة المرجعية. p_2 هو ضغط الصوت المتوسط على زمن – طويل نتيجة تخاطب مباشر متولد عند أذن المستمع بواسطة نفس المتحدث المستخدم صوت متزايد لكن في ظروف الاتصال الفعلية الموجودة. بمعنى أن p_2 تتضمن تأثيرات التكبير، التركيز، المسافة، والعوائق بين المتحدث والمستمع. يجب استخدام مرشح متغير باستمرار رفيع – الحزمة لقياس كل من p_1 و p_2 .

يتم معالجة الخصائص التوجيهية لنظام تقوية ـ الصوت أو لسطح عاكس أو لقبة عاكسة بالقرب من المتكلم كجزء الكسب الأورثوتليفونك. على سبيل المثال، إذا كانت القبة العاكسة ترفع مستوى الحديث المباشر بـ 3 ديسيبل، أى تضيف 3 ديسيبل إلى دليل التوجيهية للصوت نفسه. بالتالى، فإنها تضيف 3 ديسيبل إلى الكسب الأورثوتليفونك.

في الفضاء (عديم الصدى) الحر يوجد الكسب الأورثوتليفونك من الشكل 15ـ13. بمعنى أخر، يتناقص مستوى الصوت بشكل منتظم مع المسافة بمعدل 6 ديسيبل لكل مضاعفة المسافة، بحيث أن الكمية التى ينزاح بها مركز المنطقة المظللة لأعلى أو لأسفل للمتكلم وللمستمع في فضاء غير مردد (عديم الصدى) تعطى في الشكل 15ـ13. يتضمن أيضا تأثيرات شدة الصوت.



الشكل 15ـ13 مخططات (كنتورات) للوضع المناسب لمنطقة دليل وضوح الصوت المظلل في الشكل 13ـ14. يعطي هذا المخطط الكسب الأرثوتيليفونك لشخصين يتواجهان في فضاء حر عند المسافة المبينة. تم أخذ مستوى الصوت في الاعتبار أيضا. الصفر ديسيبل يقابل صوت متزايد عند 3 قدم. في الفضاء الحر، يكون الكسب الأرثوتيليفونك دالة في المسافة وحدها وليس التردد.

يحمل هذا المخطط أيضا الجزء المباشر للحديث في الغرفة المرددة، بشرط أن الانعكاسات، من السطوح المركزة أو من القبب العاكسة، التى تشترك ضمن الـ 0.05 ثانية مع بالصوت المباشر تعتبر جميعها إضافات إلى الجزء المباشر.

2ـ تتحرك المنطقة المظللة في الشكل 13ـ14 إلى اعلى وإلى أسفل ويتغير شكلها كدالة في التردد بإضافة الكسب الأورثوتليفونك (بالديسيبل) إليها. إذا تحدث الشخص عند مستوى كلام أخر غير المبين، فإن المنطقة المظللة سوف تنزاح أبعد إلى أعلى أو إلى أسفل بالكميات المعطاة في الجدول 13ـ3.

3ـ يتعين مستوى الطيف المتوسط على زمن – طويل لضوضاء الوسط المحيط الواصلة لأذن المستمع كدالة في التردد وترسم على نفس المنحنى.

الجدول 13ـ3 التغيرات في مستوى ضغط الصوت مع حالة الصوت.

	Normal voice	Raised voice	Loud as possible without straining vocal cords	Shouting
Shift in level, db...	−6	0	+6	+12

4ـ يتم معالجة الصوت المرتد أيضا كضوضاء محيطة. قدم بولت وماكدونالد [20] (Bolt & MacDonald) بيانات، التى عندما تعدل لتتضمن الزيادة في دليل التوجيهية للحديث المباشر نتيجة إضافة نظام الصوت أو قبة عاكسة، فإنها تتيح رسم طيف "الحديث" المرتد على المنحنى في الشكل 13ـ14. يتم تعيين شكل طيف الحديث المرتد كدالة في التردد كما يلى:

(أ) عين زمن الترداد بالثانية وثابت الغرفة R بالقدم المربع عند كل تردد.

(ب) عين معامل التوجيهية التفاضلى عند كل تردد، معرف على أنه الفرق بين معامل التوجيهية للحالة الواقعية ومعامل التوجيهية للصوت فقط (لاحظ أن معامل التوجيهية للصوت فقط يتعين من نماذج التوجيهية المعطى في الباب الحادى عشر). حول إلى معامل التوجيهية (أنظر المعادلة 4ـ19).

(ج) باستخدام زمن الترداد، معامل التوجيهية التفاضلى Q، ثابت الغرفة R، والمسافة بين المصدر والمستمع r، عين $10\log(QR/r^2)$. ثم استخدم الجدول 13ـ4 عند كل تردد عدد الديسيبلات N المبين.

(د) للحصول على طيف الحديث المرتد، أطرح، عند كل تردد، تردد عدد الديسيبلات N من

الحافة العليا من منطقة الحديث المظللة في الشكل 13ـ14. هذا يعطى المنحنى الذي يتحرك لأعلى وإلى أسفل مع منطقة الحديث المظللة طالما بقيت المسافة بين المتحدث والمستمع ومعامل التوجيهية ثابتة.

5ـ يتعين دليل وضوح الصوت بإيجاد النسبة المئوية للمنطقة المظللة – المركز المرسومة في النهاية في الشكل 13ـ14 والتى لا تقع أسفل مستوى الضوضاء، أو فوق عتبة السمع، أو أسفل مستوى الصوت المرتد أو فوق خط الحمل الزائد عند 95 ديسيبل.

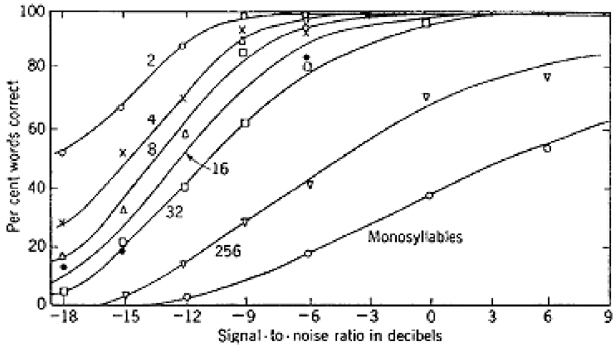
6ـ استنتج وضوح الصوت من المنحنى الموجود في الشكل 13ـ16.

الجدول 13ـ4 جدول للحسابات التقريبية لتأثير التراداد على وضوح الحديث.
Q هو معامل التوجيهية التفاضلى للمصدر، R ثابت الغرفة كما هى معرفة في الجزء الرابع والعشرين، و r هى المسافة بين المصدر والمستمع

Reverberation time, sec	N Direct speech peak level minus reverberant speech level, db						
	10 log (QR/r^2)						
	0	5	10	15	20	25	30
0.5	15	20	25	30	35	40	45
1	10	15	20	25	30	35	40
2	5	10	15	20	25	30	35
3	3	8	13	18	23	28	33
4	1	6	11	16	21	26	31

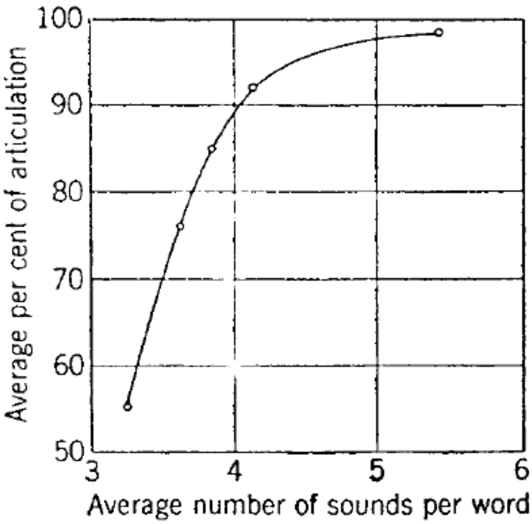
13ـ10 العوامل النفسية واللغوية تؤثر على وضوح الكلمة والجملة

إن توقع وضوح جملة أو كلمة ما يكون عملية صعبة جدا لأنها تعتمد على عوامل كثيرة خلاف مستوى الضوضاء، زمن التراداد، ومستوى الإشارات. في الشكل 13ـ17 نبين العلاقة بين النسبة المئوية للكلمات الصحيحة ونسبة الإشارة إلى الضوضاء لقوائم كلمة تتفاوت في الحجم من كلمتين إلى 256 ولكلمات الأحادية المقطع.

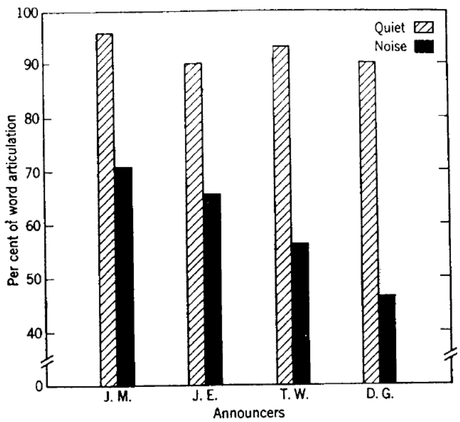


الشكل 13ـ17 العلاقة بين درجة فحص الوضوح والفرق في المستوى بين إشارة الحديث والضوضاء لقائمة فحص ذات حجم متغير. المستمعين يعرفون مصطلحات كل فحص.[27]

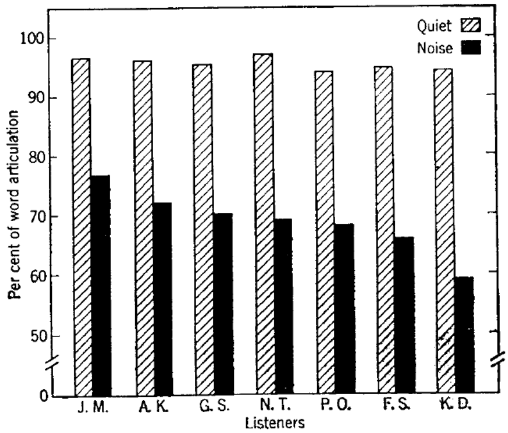
يعرف المستمع المصطلح وعليه أن يختار بين الكلمات التى استجاب لها. في الشكل 13ـ18 نرى تحسن في وضوح الكلام كلما ازداد عدد الأصوات في الكلمة. المتحدثين المختلفين والمستمعين المختلفين يحققون درجات مختلفة، كما يمكن أن نرى من الشكل 13ـ19. إن التعليم يكون عامل كبير في نتائج فحص وضوح الكلام. على سبيل المثال، في الشكل 13ـ21 نرى منحنى تعليم مثالي لطاقم الاختبار المستمع، مع جعل كلَ العوامل الأخرى ماعدا التعليم ثابتة.



الشكل 13ـ18 تحسن وضوح الكلام كلما ازداد عدد الأصوات في الكلمة. خمس مجموعات كل منها يتكون من 20 كلمة، لها متوسط مختلف لعداد الأصوات في الكلمة، تقرأ 20 مرة لمجموعة من المستمعين.[28]



الشكل 13ـ19 رسم بيانى يبين الفروق في درجات وضوح الكلام – للكلمة تم الحصول عليها لأربعة مذيعين مختلفين. [28]



الشكل 13ـ20 رسم بيانى يبين الفروق في درجات وضوح الكلام – للكلمة تم الحصول عليها لمجموعة نموذجية من المستمعين. [28]

تبين العوامل المختلفة أن اختبارات وضوح كلام – التخاطب يجب أن تؤخذ فقط بعد تخطيط جيد وأن الطبيعة الإحصائية للنتائج يجب أن تقدر بالكامل.[26] تبين العوامل التى تمت مناقشتها من قبل أن التوقعات المطلقة لدرجات وضوح الكلام لا تكون ممكنة. مع ذلك، يمكن القول بأنه إذا زاد دليل وضوح الصوت المحسوب عن 60٪، فإن نظام اتصال – الحديث يكون مقبولا تقريبا. إذا كان دليل وضوح الصوت المحسوب أقل من 60٪، فإن النظام يكون غير مقبول تقريبا. بين 30 و60٪، فإنه يجب النظر إلى النظام بشيء من الشك وأداء اختبارات وضوح الصوت تفصيلية إذا كان ممكنا.

مثال

نظام تقوية – صوت يستخدم في صالة إسماع. إن خصائص الصالة والصوت ونظام التقوية تكون كما هو مدون في الجدول 13-5. أحسب دليل وضوح الكلام عند مقعد يبعد 60 قدم عن السماعة لشخص يتحدث بصوت متزايد. علق على كفاية النظام. حجم الصالة هو 1 مليون قدم مكعب، وعدد المقاعد في الصالة هو 4000 شخص.

الجدول 13-5 الصفات المميزة لصالة استماع، للصوت، ولنظام التقوية.

Frequency, cps (1)	Reverberation time T, sec, full audience (2)	Room constant R, ft² (3)	Speech peaks, raised voice, at 1 m, db (4)	Orthotelephonic gain at 60 ft, db (5)	Differential directivity factor Q of system (6)	Ambient noise in ⅓ octave bands, db re 0.0002 microbar (7)
270	2.0	2.5×10^4	50	−10	10	42
380	1.8	2.8	51	− 2	16	36
490	1.6	3.1	52	0	20	36
630	1.5	3.3	52	2	20	33
770	1.4	3.6	51	3	20	33
920	1.3	3.8	50	3	20	32
1070	1.2	4.2	48	2	20	30
1230	1.2	4.2	47	3	20	29
1400	1.2	4.2	45	4	20	26
1570	1.1	4.6	44	5	20	25
1740	1.1	4.6	42	7	20	24
1920	1.1	4.6	41	6	20	24
2130	1.1	4.6	40	6	20	24
2370	1.1	4.6	38	5	20	24
2660	1.0	5.0	37	3	20	24
3000	1.0	5.0	36	2	20	24
3400	1.0	5.0	34	0	20	24
3950	1.0	5.0	31	− 2	20	24
4650	1.0	5.0	27	− 5	20	25
5600	1.0	5.0	22	−10	20	26

الحل

بإتباع الطريقة التى أعطيت في الفصل 13-9، نجمع أولا الكسب الأرثوتيليفونك لمستويات ذروة الحديث. يظهر هذا في العمود 2 من الجدول 13-6 ومقادير الإزاحة لأعلى والمشوه لشكل المنطقة المظللة في الشكل 13-14. بعد ذلك، يتم تحويل طيف ضوضاء الوسط المحيط، كما

هى معطاة في حزم الأكتاف – الثالث إلى مستوى طيف عن طريق طرح 10 أمثال لوغاريتم عرض الحزمة من كل عدد (أنظر العمود 3). عين $10\log_{10}(QR/r^2)$ (أنظر الأعمدة 4 و5). استخدم الجدول 13-4 لتحصل على N وأطرح هذا العدد من الديسيبلات من العمود 2. هذا يعطى العمود 7.

يجب أن نضيف قاعدة (أساس) طاقة، الأرقام التى تظهر في الأعمدة 3 و7، تعطينا الطاقة للضوضاء المتداخلة الكلية. تم تدوين النتيجة في العمود 8. للحصول على دليل وضوح الكلام لكل حزمة، أطرح العمود 8 من العمود 2 (مع وضع كل الفروق الأكبر من 30 ديسيبل تساوى 30)، وأقسم على 30×20 لأنه توجد 20 حزمة وكل حزمة لها أقصى مساهمة تساوى 30 ديسيبل. دونت النتائج في العمود 9. دليل وضوح الكلام يساوى مجموع الأرقام الموجودة في العمود 9، وهي تساوى 0.82. النسبة المئوية التقريبية للكلمة وضوح الكلام من الشكل 13-16 تكون 98 ٪ للمستمع المتدرب، الذي يعرف المفردات الكاملة و80٪ للمستمع المتدرب. ينطبق هذا على الشخص الموجود على بعد 60 قدم من السماعة. بالنسبة للمستمع الأقرب، سوف يكون دليل وضوح الكلام أكبر، وبالنسبة للمستمع الأبعد سيكون أقل.

هذا النظام يجب أن يكون مقبول تماما عند وجود جمهور كامل. لكن عند عدم وجود جمهور يكون زمن الترداد لهذه الصالة الخاصة في حدود 2 ثانية أعلى، لذلك تكون N في العمود 7 من الجدول 13-6 في حدود 13 ديسيبل أقل (لأن كل من R و T تتغير)، والعمود 7 سيكون أعلى بمقدار 13 ديسيبل تقريبا. هذا سوف يجعل مستويات الكلام المرتد متساوية تقريبا مع مستوى طيف ضوضاء الوسط المحيط لذلك سوف يهبط دليل وضوح الكلام إلى 0.65 تقريبا. بالرغم من أن كلمة وضوح الكلام المقدرة عند 60 قدم سوف تظل مقبولة، إلا أن دليل وضوح الكلام للمقاعد الأبعد من 60 قدم ستكون أقل لأن العدد N يقل 6 ديسيبل لكل مضاعفة للمسافة. على سبيل المثال، عند مسافة 180 قدم (مؤخرة القاعة) مع عدم وجود جمهور، ستكون N حوالى 23 ديسيبل أقل منها في العمود 7، وهذا يعطى دليل وضوح الكلام 0.44 تقريبا. هذا يقابل تقدير لكلمة وضوح كلام تساوى 86٪ للمستمعين المتدربين أو 45٪ للمستمعين غير

المتدربين، الأمر الذي يصعب تقبله.

الجدول 6ـ13 حسابات دليل وضوح الكلام

Frequency, cps (1)	Speech peaks plus ortho-tele-phonic gain, db (2)	Spec-trum level of ambient noise, db (3)	$\frac{QR}{r^2}$ (4)	10 log $\frac{QR}{r^2}$, db (5)	N, db (6)	Rever-beration speech spec-trum, db (7)	Energy summa-tion of Cols. (3) and (7) (8)	Articula-tion index, Col. (2) minus Col. (8) divided by 600 (9)
270	40	21	70	18	23	17	22	0.030
380	49	29	125	21	26	23	30	0.032
490	52	30	172	22	30	22	31	0.035
630	54	32	183	23	31	23	33	0.035
770	54	31	200	23	31	23	33	0.035
920	53	29	210	23	32	21	30	0.038
1070	50	26	232	24	33	17	27	0.038
1230	50	25	232	24	33	17	26	0.040
1400	49	24	232	24	33	16	25	0.040
1570	49	23	255	24	34	15	24	0.042
1740	48	22	255	24	34	14	23	0.042
1920	47	20	255	24	34	13	21	0.043
2130	46	19	255	24	34	12	20	0.043
2370	43	15	255	24	34	9	16	0.045
2660	40	12	280	24	34	6	13	0.045
3000	38	9	280	24	34	4	10	0.047
3400	34	5	280	24	34	0	6	0.047
3950	29	−1	280	24	34	−5	0	0.048
4650	22	−10	280	24	34	−12	−8	0.050
5600	12	−20	280	24	34	−22	−18	0.050
								0.825

الجزء الثاني والثلاثون – المعايير النفسصوتية

يكون التصميم السمعي في الغالب من أجل الغرض المخصص له وهو إرضاء بعض الحاجة الإنسانية. تصمم السماعة والميكروفون لجعل الموسيقى لطيفة أو لجعل الكلام واضح للبشر. تكون السيطرة على الضوضاء من أجل راحة الأفراد. نحن نصمم صالاتنا، قاعات الدراسة، المبانى

العامة والخاصة لإرضاء رغبات الاستماع للناس.

في هذا الجزء سوف يتم تقديم هذه المعايير للتصميم الصوتى والتى هى في الوقت الحالى شائعة الاستخدام[29]. عند استخدام منحنيات المعايرة هذه يجب تذكر أنه قبل عام 1945 كانت المعايير الوحيد المنشورة هى تلك التى تعطى أزمنة الانعكاس القصوى للصالات ومنحنيات الاستجابة المطلوبة لأنظمة إعادة إنتاج الموسيقى. منحنيات المعيار المعطاة هنا المتعلقة تلف السمع، تداخل الحديث، ومستويات الضوضاء المنزلية تم تطويرها حديثا. لذلك، يجب توقع أن هذا الفرع من المعرفة يكون في حالة مائعة، ويجب على القارئ الاستشهاد بالمراجع الحديثة لمسايرة التقدم.

11ـ13 المستويات التى تولد تلف للسمع[2,30,31]

الاعتبار المهم في أغلب الصناعات هو أن مستويات الضوضاء في فراغات المصنع يجب أن تكون منخفضة بما فيه الكفاية لكي لا تعرض سمع المستخدمين للخطر عند التعرض للضوضاء فترات زمنية طويلة. تستند المعايير التجريبية الموضوعة لمنع ضرر السمع على تحليل كل المعلومات الموثوقة على الموضوع في المراجع. باختصار، تنص هذه المعايير على أنه، في منطقة التردد فوق 300 هيرتز، يجب ألا تتجاوز مستويات الصوت في أي من الحزم الحرجة 80 ديسيبل تقريبا مع مرجع 0.0002 ميكروبار.[30] أسفل 300 هيرتز، تتوفر بيانات تخطيطية فقط بالتالى يمكن عمل تخمينات تجريبية فقط.[29] يبين العمود 2 في الجدول 13ـ7 هذه المستويات المخمنة لنغمات نقية أو لعرض حزم ضوضاء متصلة لا تسبب تلف للسمع كدالة في التردد.

الطريقة الشائعة جدا لقياس الضوضاء هى استخدام مجموعة من مرشحات الموجة التى تقسم التردد إلى 8، 16، أو 24 منطقة، وعرض كل منطقة يساوى أوكتاف واحد، نصف – أوكتاف، أو ثلث – أوكتاف. في قياس الضوضاء التى لها طيف تردد متصل بواسطة هذه المرشحات، فإن المستويات في كل حزمة أوكتاف سوف تكون أعلى من القيم المدونة في العمود 2 من الجدول 13ـ7 تقريبا بعدد الديسيبلات المعطاة في العلاقة،

$$\begin{aligned}&\text{Added number of decibels in using a wide - band filter as}\\&\text{compared with a filter with critical bandwidth} = 10\log_{10} N\end{aligned} \qquad \text{سطر 13-2}$$

حيث N تساوى عدد الحزم الحرجة الواقعة خلال الحزمة الأعرض.

إن تطبيق المعادلة 13ـ2 على حزم التردد الأعرض في الجدول 13ـ7 يعطى بشكل تقريبى المستويات المبينة. على سبيل المثال، في الحزمة 1200 إلى 2400 هيرتز، سمع بأذنين، يوجد بالتقريب 16 حزمة حرجة. من المعادلة 13ـ2 نحصل على $10\log_{10} 16 \approx 12\text{db}$. يضاف هذا الرقم إلى 83 ديسيبل قيمة العمود 2 وتكون النتيجة 95 ديسيبل.

الجدول 13ـ7 لمعايير ضرر الخطر

Fre-quency, cps	Pure tone levels or critical band levels of continuous noise	Octave-band frequencies, cps	Octave-band levels of continuous noise	Half-octave-band frequencies, cps *	Half-octave band levels of continuous noise	Third-octave-band frequencies, cps *	Third-octave-band-levels of continuous noise
50	110	37.5– 75	110	37.5– 53	108	45– 57	107
100	95	75– 150	102	75– 106	100	90– 114	99
200	88	150– 300	97	150– 212	94	180– 228	93
400	85	300– 600	95	300– 425	91	360– 456	90
800	84	600–1200	95	600– 850	91	720– 912	90
1600	83	1200–2400	95	1200–1700	91	1440–1824	90
3200	82	2400–4800	95	2400–3400	91	2880–3648	90
6400	81	4800–9600	95	4800–6800	91	5760–7296	90

لاحظ في الجدول السابق تم تدوين المعايير التجريبية خطر يمكن إهماله لتلف السمع. عدم تجاوز المستويات المبينة بالديسيبل يعتبر تأمين معقول لعدم حدوث ضرر دائم. الوحدة: ديسيبل: هى مصدر مرجعى تساوى 0.0002 ميكروبار. الرمز * في بعض يفيد أنهتم تدوين جزء فقط من الحزمة هنا لاختصار المكان. يصلح هذا الجدول لفترات (سنوات) طويلة من التعرض. أيضا لا تؤخذ الأعداد حرفيا. في الحقيقة الأعداد الأقل بـ 10 ديسيبل سوف تتضمن خطر بسيط، بينما الأعداد الأعلى بـ 10 ديسيبل سوف تتسبب في تلف سمع ملحوظ. تكون مستويات لضوضاء المطبقة التي يتعرض لها شخص لوقت كبير ومستمر بدون قمم طاقة حادة كبيرة.

المقصود بأعداد المدونة في الجدول 13ـ هو أنه إذا وقعت مستويات الضوضاء تحت المستويات المدونة في كل حزم التردد، مثلا، بمقدار 5 ديسيبل، فإن فرصة معاناة الناس الموجودة في مثل هذا البيئة للمعاناة من تلف السمع بسبب الضوضاء ستكون صغيرة جدا، حتى إذا كانوا يعملون في الضوضاء 8 ساعات في اليوم ولمدة 50 أسبوع في السنة ولفترات في حدود 5 سنوات. ما تلك البيانات

التى كانت متوفرة لتأسيس هذه الأرقام ولم تتضمن حالة ضوضاء معروفة لناس كانوا فيها لأكثر من 5 سنوات. من ناحية أخرى، إذا وقع أحد مستويات الضوضاء في حزمة ما فوق عدد المعيار تلك الحزمة، مثلا، بمقدار 5 ديسيبل، فإنه ستكون هناك فرصة حقيقية لبعض الناس أن يعانون من تلف السمع بسبب الضوضاء إذا عملوا في تلك البيئة لفترة أكثر من السنة.

من المعروف أن الناس في العادة يستعيدون جزء كبير من السمع المفقود بعد الاستراحة الممتدة. يجب الحكم على مدى الضرر السمعي المحتمل بعد أن يأخذ الشخص الذي تعرض استراحة لمدة اسبوع تقريبا ويكون قد وصل إلى عتبة سماعية مستقرة.

علاوة على ذلك، يوجد تغير كبير بين الأفراد ، وبعض الناس يصبحون صم حتى مع ممارسة عمل طبيعى في الخلاء (مثل البستنة) نتيجة تقدم العمر، الأمراض، والأسباب الأخرى. بالإضافة إلى هذا، إن الصمم، مثل الموت، هو مسألة إحصائية، وأي مجموعة معينة من عدد المعيار ستخفق في توقع الضرر السمعي وذلك لقلة عدد العينات من الناس. لهذا، يجب النظر في الأرقام المدونة في الجدول 13ـ7 على أنها أرقم معقولة عند استخدامها في التصميم الصوتى.

إن الفعل الحسن لأرباب الأعمال أن يكون لديهم برنامج إيجابي لفحص السمع عند المستخدمين في وقت العمالة ولإعادة فحص سمعهم في فترات منتظمة عند وجود أىَ ضوضاء كبيرة في المصنع – حتى وإن كانت هذه الضوضاء تقع تحت الأرقام المشار إليها في الجدول 13ـ7 في كل حزم التردد.

13ـ12 مستويات تداخل الكلام

في الباب السابق ناقشنا بعض العوامل التى تحكم وضوح الحديث (الكلام). ذكرنا أن طاقة الكلام الأقل من 200 هيرتز والأعلى من 7000 هيرتز لا تساهم في وضوح الكلام. وضحنا أيضا أنه إذا كان تدريج التردد مقسم بشكل ملائم إلى حزم تشارك بالتساوى في دليل وضوح الكلام، فإنه يمكن تعيين تأثير الضوضاء على وضوح الكلام عن طريق إيجاد متوسط الفرق بين مستويات الذروة (بالديسيبل) للكلام وج م م مستويات الضوضاء في الحزم وقسمة هذا المتوسط على 30. لبيان متوسط الفرق هذا، افترض أن مستويات الذروة للكلام هى 80، 75، 70، و65 في أربعة حزم وج م م مستويات الضوضاء هى 60، 55، 50، و45، على الترتيب، في نفس الحزم الأربعة. حينئذ، يكون متوسط الفرق 20 ديسيبل، ودليل وضوح الكلام في هذه الحزم الأربعة

$20/30 = 0.67$. لكن، مع وضع أى فرق أكبر من 30 ديسيبل في أى حزمة تردد يساوى 30 ديسيبل.

بالإشارة إلى الشكل 13-14 يتبين أنه غذا أردنا تقسيم تدريج التردد إلى ثلاث حزم متساوية المساهمة في وضوح الكلام، باستخدام جهاز التحليل، يجب علينا تقسيمه إلى مناطق التردد 300 إلى 1200 هيرتز، 1200 إلى 2400 هيرتز، و2400 إلى 4800 هيرتز. مع ذلك، بسبب أن تدريج تردد دليل وضوح الكلام يكون أكثر خطية أسفل 1000 هيرتز من اللوغاريتم (أنظر الشكل 13-14)، فإن متوسط الشدة في الحزمة 300 إلى 1200 هيرتز تكون غير صحيحة. علاوة على ذلك، يتضمن جهاز التحليل المتوفر على الحزم 300 إلى 600، 600 إلى 120، 1200 إلى 2400، و2400 إلى 4800 هيرتز.

في حالة التقريب القريب بشكل كافى، إذا لم يكون المستوى في الحزمة 300 إلى 600 هيرتز أكثر من 10 ديسيبل أعلى من منه في الحزمة 600 إلى 1200 هيرتز، فإنه يمكننا استخدام الحزمة 600 إلى 1200 هيرتز محزمة أولى ومن ثم تعريف مستوى تداخل – الكلام على أنه المتوسط الحسابى لمستوى ضغط الصوت في الحزم الثلاثة 600 إلى 1200 هيرتز، 1200 إلى 2400 هيرتز، و2400 إلى 4800 هيرتز.[23,33] ومع ذلك، إذا كان المستوى في الحزمة 300 إلى 600 هيرتز أكثر من 10 ديسيبل أعلى من منه في الحزمة 600 إلى 1200 هيرتز، فإنه بدلا من ذلك يجب استخدام متوسط المستويات في الحزم الأربعة الموجودة بين 300 و4800 هيرتز.

يجب أن نؤكد على أن مستوى تداخل – الكلام للضوضاء عند موضع معين لا يقدم أى معلومات عن كيف سيكون وضوح – الكلام بالنسبة لمستمع عند ذلك الموضع لأنه لا يصف مستوى الكلم نفسه. إذا كانت مستويات قمم الكلام معروفة أيضا عند ذلك الموضع، فإنه يمكن تقدير دليل وضوح الكلام (الفصاحة) باستخدام الطريقة التالية: -

1-باستخدام التدريج " البطيء" (دائرة اضمحلال عالى) في محلل حزمة - الأوكتاف، عين ج م م مستويات ضغط الصوت المتوسط للضوضاء في الحزم 600 إلى 1200 هيرتز، 1200 إلى 2400 هيرتز، و2400 إلى 4800 هيرتز. ثم خذ المتوسط الحسابى لمستويات الضوضاء في هذه الحزم

الثلاثة. هذا المتوسط يكون عبارة عن متوسط تداخل الكلام.

2ـ باستخدام التدريج " السريع" في محلل حزمة ـ الأوكتاف، عين قمم مستويات ضغط الصوت في الحزم 600 إلى 1200 هيرتز، 1200 إلى 2400 هيرتز، و2400 إلى 4800 هيرتز. يجب أن تكون مستويات الضوضاء منخفضة بشكل كافي حتى لا تساهم في قراءات القمة، وفي حالة غير ذلك يجب استخدام بعض الوسائل لفصل الإثنين – مثل غلق نظام تكييف الهواء أو الانتظار لمدة ساعة عند تخميد ضوضاء الخلفية. أوجد المتوسط الحسابى لهذه الحزم الثلاثة. لا يستجيب مقياس مستوى – الصوت بسرعة كافية لبيان مستويات القمة الحقيقية (1 ٪)، لذلك يجب إضافة 4 ديسيبل إلى الرقم المعين توا. هذا يعطى مستويات القمة المضبوطة للكلام.

3ـ الفرق بين مستويات القمة المضبوطة للكلام ومستوى تداخل – الكلام يعطى العدد الذي عندم يقسم على 30 يعطى دليل وضوح الكلام بالتقريب. في حالة الحسابات الأكثر دقة، يجب استخدام الطرق الأكثر تفصيلا الموجودة في الجزء السابق.

عند وقوف شخصان، يواجه أحدهما الأخر في مجال ضوضاء، فإن أقصى مستويات تداخل – للكلام تكون هى التى تسمح بالكاد بالاتصال الموثق عند مستويات صوت ومسافات مختلفة كما هو مبين في الجدول 13ـ8. لعمل هذا الجدول، يفترض أصوات ذكر متوسط العمر وسمعه جيد، هذا بالإضافة إلى مادة كلام غير متوقعة. إذا كانت المفردات محدودة أو إذا كانت تنطق جمل فقط، فإن مستويات تداخل – الكلمة الجائز قد تزداد بمقدار 5 ديسيبل تقريبا. إذا كانت المتحدثة امرأة، فإن مستويات تداخل – الكلمة الجائز يجب أن تقل بمقدار 5 ديسيبل. يفترض غياب الأسطح العاكسة.

13ـ13 معايير المناطق السكنية

تحتاج إدارة المصانع الموجودة بالقرب من المناطق السكنية في أغلب الأحيان إلى اعتبار الضوضاء التى تحدث بواسطة تشغيل المصانع. بالرغم من أن هذه المشكلة موجودة بالفعل، إلا ان وصول طائرة الحرك النفاث جلب سؤال سيطرة ضوضاء الجوار إلى الواجهة. مؤخرا لعبت عدة مجموعات متخصصة في علم صوتيات أجزاء مهمة في تأسيس هذه المعايير، لكن، كما ذكرنا في وقت

سابق، فإن تراكم الخبرة في هذا المجال تفرض مراجعة بعض الأعداد المعينة في المعايير.[34]

الجدول 13ـ8 مستويات تداخل – الكلام (بالديسيبل مع مرجع 0.0002 ميكروبار) التى تسمح بوضوح كلام موثوق بالكاد في المسافة ومستويات الصوت المشار إليها. يفترض عدم وجود سطح عاكس لمساعدة الحديث المباشر[33]

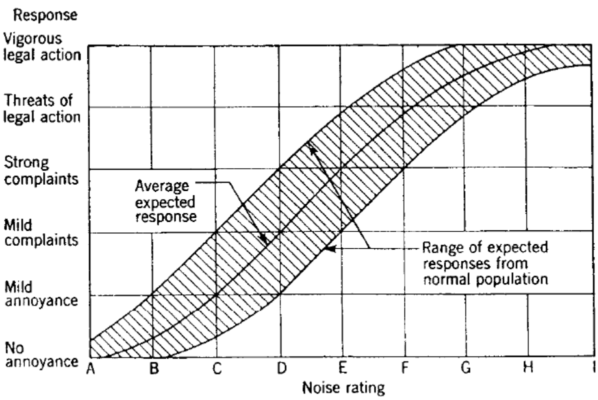
المسافة بالقدم	مستوى الكلام (لذكر متوسط العمر)			
	طبيعى	متزايد	عالى جدا	صياح
0.5	71	77	83	89
1	65	71	77	83
2	59	65	71	77
3	55	61	67	73
4	53	59	65	71
5	51	57	63	69
6	49	55	64	67
12	43	49	55	61

للوصول إلى منحنى معيارى لحى معين، يتم الاستعانة بالأشكال 13ـ22 و13ـ23 والجدول 13ـ9.[2] أولا، قرر مدى الاستجابة للحى الذي ترغب في تحقيقها، بمعنى بدون إزعاج، إزعاج معتدل، شكاوى معتدلة، شكاوى قوية، تهديدات أفعال شرعية ، أو أفعال شرعية نشيطة. حينئذ، أدخل الشكل 13ـ22، واختر الحرف (من A إلى I) الذي نتيجة هذا الاختيار. على سبيل المثال، أفترض أن المرغوب بدون إزعاج مطلق. حينئذ فإن معدل الضوضاء A يستعمل.

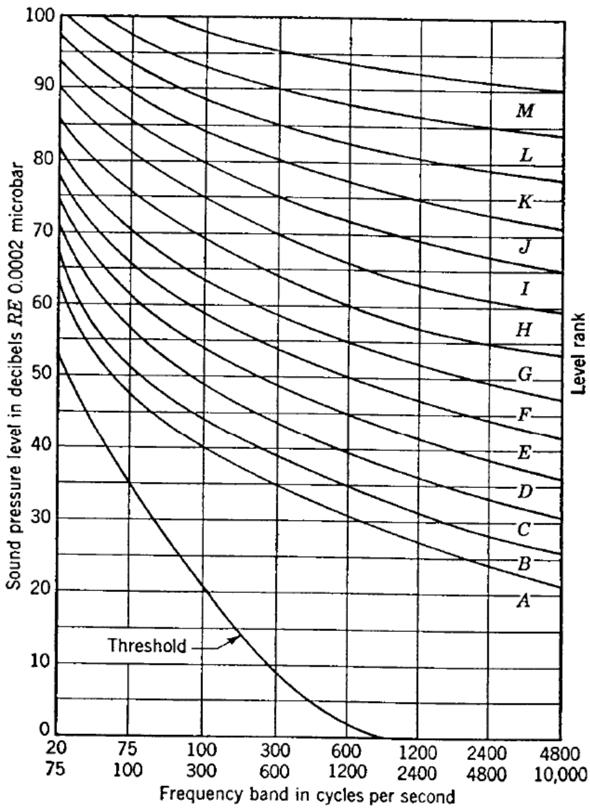
بعد ذلك استخدم الجدول 13ـ9 لضبط المعدل إلى أعلى أو إلى أسفل بواسطة العدد المؤكد للحروف. على سبيل المثال، دعنا نفترض الحالة حيث يكون لدينا ضوضاء ذى طيف – متصل (0)، ضوضاء دفعيه مثل طرق المعادن (+1)، تعرضات من 10 إلى 60 مرة في الساعة (ـ1)، حيَ حضري قريب من بعض الصناعات (ـ2)، ساعات النهار فقط (ـ1)، تعرض سابق كبير (ـ1). المجموع الكلى لهذه المجموعة هو ـ4. لهذا، يكون ترتيب المستوى الصحيح لهذا الحي وهذا النوع من الضوضاء هو 4 حروف أقل حدة من A، بمعنى E.

يتم إيجاد معيار مستوى – الضوضاء للحى، بمساعدة الشكل 13ـ23، من ترتيب المستوى المعين توا. على سبيل المثال، بالنسبة لترتيب المستوى E، يجب ألا يقع مستوى ضوضاء الحي في كل حزمة تردد أوكتاف فوق المنحنى المرسوم فوق الحرف E في الشكل 13ـ23. إذا كان مرغوب عامل هندسى إضافي للأمان، فإن المستويات يجب ألا تقع فوق المنحنى المرسوم تحت

الحرف E في الشكل 13ـ23.



الشكل 13ـ22 العلاقة بين استجابة السكان في حي لمعدل الضوضاء المسببة للاستجابة. [2]



الشكل 13ـ23 العلاقة بين طيف تردد حزمة – الأوكتاف وترتيب مستوى الضوضاء في الحي. ترتيب المستوى للضوضاء الكلية يساوي ترتيب المستوى الأعلى المتحقق في أي حزمة تردد. [2]

في الحالات حيث يكون طيف الضوضاء معروف بالفعل والمطلوب هو معدل الضوضاء، فإنه يجب

إجراء الطريقة السابقة بشكل عكسى. يتم تركيب طيف ضوضاء حزمة – الأوكتاف المقاسة على الشكل 13ـ23. يعطى ترتيب مستوى الضوضاء بواسطة المساحة الأعلى التى يتداخل فيها الطيف في أى حزمة. تشير هذه الطريقة ضمنا إلى أن مستوى الضوضاء في حزمة وحيدة يمكن أن يعين رتبة المستوى بشكل فريد.

بعد ذلك، يتم استخدام الجدول 13ـ9 للحصول على عدد التصحيح الذي يجب تطبيقه على ترتيب المستوى ليعطى معدل الضوضاء. في النهاية، باستخدام الشكل 13ـ22 يتم ترجمة معدل الضوضاء إلى تفاعل الحي المحتمل مع الضوضاء.

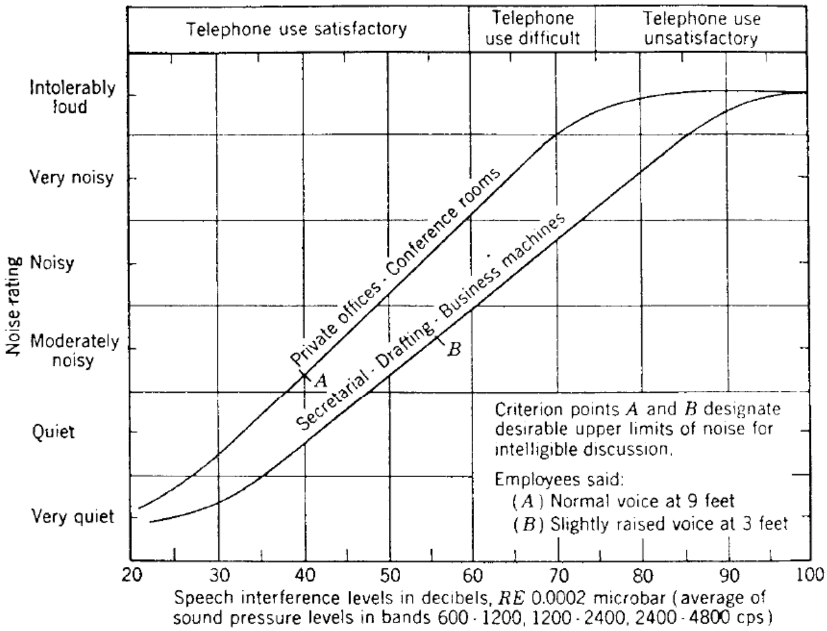
الجدول 13ـ9 قائمة أعداد التصحيح الواجب تطبيقها على ترتيب المستوى ليعطى معدل الضوضاء.

Influencing factor	Possible conditions	Correction No.
Spectrum character	Continuous	0
	Pure-tone components	+1
Peak factor	Continuous	0
	Impulsive	+1
Repetitive character (20- to 30-sec exposures assumed)	One exposure per min (or continuous)	0
	10–60 exposures per hr	−1
	1–10 exposures per hr	−2
	4–20 exposures per day	−3
	1–4 exposures per day	−4
	1 exposure per day	−5
Background noise	Very quiet suburban	+1
	Suburban	0
	Residential urban	−1
	Urban near some industry	−2
	Area of heavy industry	−3
Time of day	Daytime only	−1
	Nighttime	0
Adjustment to exposure	No previous exposure	0
	Considerable previous exposure	−1
	Extreme conditions of exposure	−2

يجب تقع الضوضاء المتولدة في أماكن النوم في البيوت أو الشقق بسبب مصادر موجودة في أجزاء أخرى من نفس البناية في كل حزم التردد تحت المنحنى الأدنى للمنطقة الملائمة من الشكل 13ـ23 بحوالي 5 ديسيبل.

13ـ14 معيار أروقة المكاتب

في أروقة المكاتب، يكون الاتصال المقبول للكلام سبب رئيسى للسيطرة على الضوضاء. في مسح لشروط الضوضاء في الشركات الكبيرة لمعالجة ـ المعادن، شركات تصنيع ـ الراديو، والمؤسسة التربوية، وجد أنه عند سؤال عمال المكتب لتقدير الضوضاء على مقياس يتراوح من "هادئ جدا " إلى "عالية بشكل لا يطاق"، عملوا ذلك بتناسب تقريبى مع مستوى تداخل ـ الكلام. أيضا، اتضح أن المعدل يعتمد على وظيفة فضاء المكتب، بمعنى مكتب خاص، مكتب سكرتارية، وخلافه. تم عرض النتائج في الشكل 13ـ24.[35] في هذا الشكل تم بيان معدل الضوضاء على المحور الرئيسي، ومستويات تداخل – الكلام على المحور الأفقى، كما تم تمثيل درجة الرضا عن استخدام التليفون على المحور الأفقى العلوى.



الشكل 13ـ24 تدريج معدل الضوضاء في فضاء مكتب كدالة في مستويات تداخل الكلام.[35]

عند سؤال العاملين قالوا إن النقطة A في الشكل 13ـ24 تقابل الصوت الطبيعى عند 9 قدم والنقطة B تقابل تقريبا الصوت المتزايد عند 3 قدم. بمقارنة هذه البيانات مع الأعداد المعطاة في الجدول 13ـ8 يتبين أن العاملين يرغبون مستويات تداخل كلام أقل بـ 6 ديسيبل عن تلك المبينة في الجدول. قدم الجدول 13ـ8 أصوات رجل متوسط. تكون أصوات المرأة أقل بعدة ديسيبلات وأيضا يكون انتشار الأصوات الرجالى في المتوسط حوالى $\pm 8db$ ، الأمر الذي يمكن أخذه في

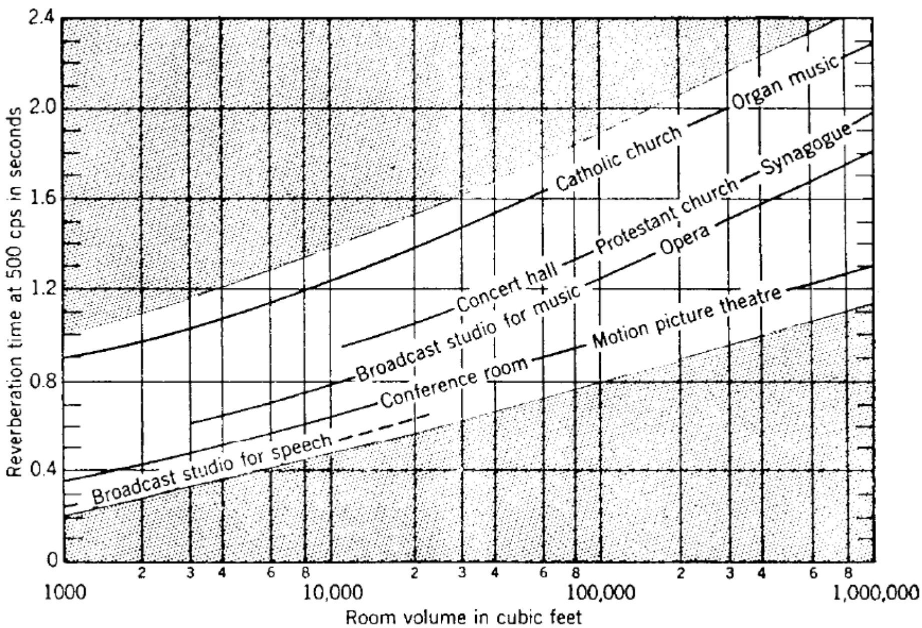
الاعتبار.

يستند تدريج المعدل للحديث التيليفوني المبين في أعلى الشكل 13ـ24 على نداءات بين المدن تستعمل مجموعة هاتف F-1 (ليست آخر مجموعة بالأعداد خارج اللوحه الأمامية). في حالة النداءات خلال مبادل مفرد حديث تكون مستويات تداخل الكلام المقبولة في حدود 5 ديسيبل أعلى من تلك المبينة. بالنسبة لجهاز التليفون الحديث، عموما توجد ظروف مبادل داخلى للنداءات بين المدن.

13ـ15 معايير الصالات

زمن الترداد T مقابل التردد

تقليديا، معيار لتصميم الغرفة والصالات هو أن زمن ترداد T تم تعريفه بالمعادلة 10ـ36. يستند هذا المعيار على أحكام جمهور على جودة السمع الموجودة للغرف والصالات.[36,37]



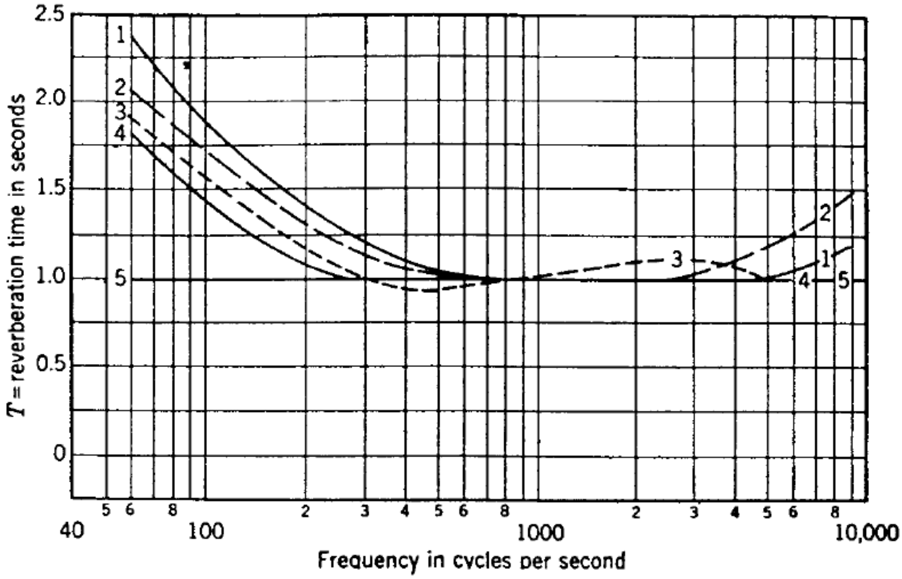
الشكل 13ـ25 زمن الترداد الدقيق لغرف ذات أحجام واستخدام متنوع. (تم تجميع البيانات من المراجع ومن مكتب بيرانيك ونيومان للاستشارات الصوتية.)

يبين الشكل 13ـ25 الملخص المعقول لزمن الترداد الدقيق المقبول حاليا. بشكل عام تستخدم هذه

القيم عند التردد 500 هيرتز. يبين الشكل 13-26 ومن التراداد الدقيق عند ترددات أخرى منسوب إلى تلك الزمن عند 500 هيرتز. تم بيان منحنين إثنين، أحدهما للكلام والأخر للموسيقى.

ثابت الغرفة R

إن الطريقة الحديثة لتحديد خصائص التراداد للغرفة هوى بدلالة ثابت الغرفة R المعرف بالمعادلة 10-46. يبين الشكل 13-27 القيم الدقيقة للثابت R لثلاثة أصناف من الغرف بدلالة حجم الغرفة. يتم تصميم بعض صالات الحفلات الموسيقية الحديثة، مثل قاعة الاحتفال الملكي بلندن، بتعريف (بجودة) عالية بشكل كبير لأن موسيقى المائة سنة الماضية أصبحت معقدة وأكثر تفصيلا، الأمر الذي يتطلب قاعة ميتة (خامدة) إلى حد معقول لتقديم العرض.

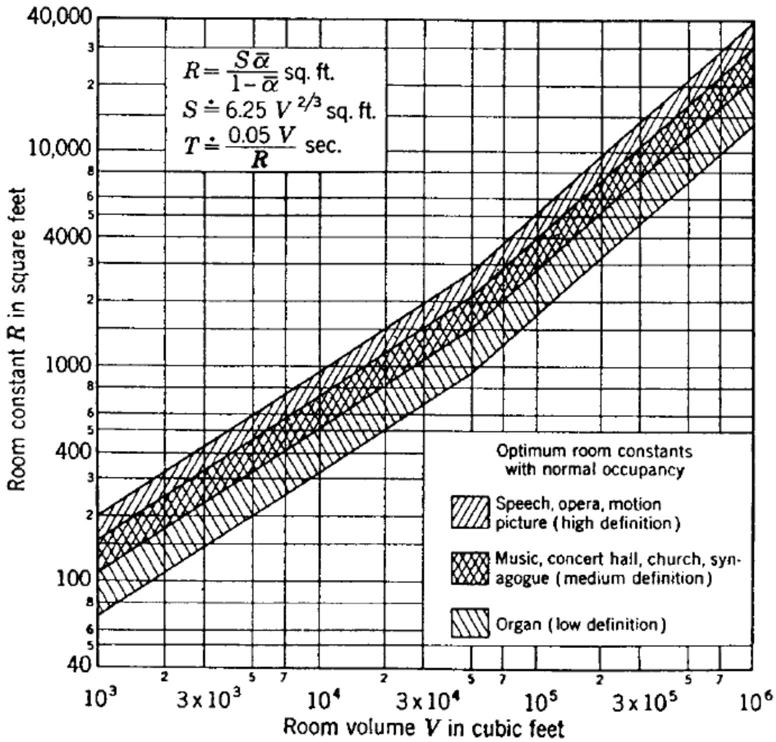


الشكل 13-26 منحنيات متنوعة مزكاة لزمن التراداد كدالة في التردد لإستوديوهات وصالات موسيقية منسوب لزمن تردد عند 1000 هيرتز. (1) Mac Nair, 1930 ، (2) Morris and Nixon, 1936 ، (3) استوديو الإذاعة بالدنمارك للموسيقى، (4) Richmond and Heyda, 1940 ، (5) v. Besket and others for speech rooms. يكون المنحني 3 أسفل 1000 هيرتز والمنحنى 5 (المسطح) فوق 1000 هيرتز مزكاة بواسطة المؤلف لغرف الموسيقى. المنحنى 5 (المسطح) يزكى عند كل الترددات لغرف الحديث.

الصدى

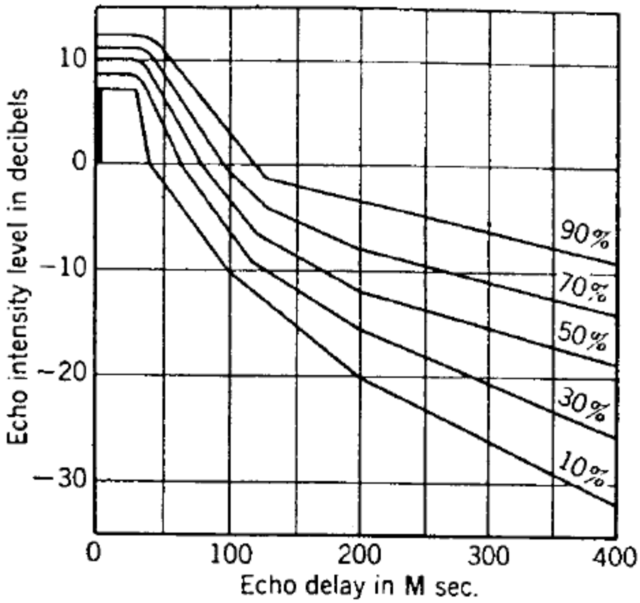
من المعروف أن الصدى يحدث عندما تصل موجة منعكسة معزولة عند أذن المستمع عند زمن

أكثر من $\frac{1}{15}$ من الثانية (67 مللى ثانية) بعد زمن وصول موجة الصوت الأصلى. يوجد في الصالات الكثير من الموجات المنعكسة التى تصل الأذن عند فترات زمنية أكبر من 70 مللى ثانية لأن زمن الترداد قد يكون كبير ويبلغ عدة ثوانى.



الشكل 13-27 القيم الدقيقة لثابت الغرفة R عند 1000 هيرتز كدالة في حجم الغرفة لثلاثة أصناف من الغرف.

تبين الفحوصات الحديثة أن انعكاسات الزمن – الطويل لا تشكل مشكلة- كبيرة إذا شدتها أقل من شدة الصوت الأولى بشكل كافى.[39] في الشكل 13-28 نبين مجموعة من المنحنيات التى تربط النسبة المئوية التقريبية لمستمع يلاحظ خطأً ما في صوتيات الصالة مع مستوى ضغط صوت الصدى كدالة في زمن التأخير، الذي يتبع وصول الصوت المباشر. على سبيل المثال، عندما يحدث الانعكاس بعد وصول الصوت المباشر في آذان مجموعة المستمعين بـ 400 مللى ثانية وإذا كان مستواه تحت مستوى الصوت المباشر بـ 20 ديسيبل، فإن نصف المستمعين تقريبا سيدركون بأن شيء مكروه قد حدث.



الشكل 13ـ28 المعيار التجريبي (غير مؤكد بشكل كبير) للإزعاج الناتج عن الصدى. الكنتورات هى لاضطراب ذات نسبة مئوية ثابتة والمحور الأفقى هو مستوى الشدة مقابل تأخير الصدى. [38]

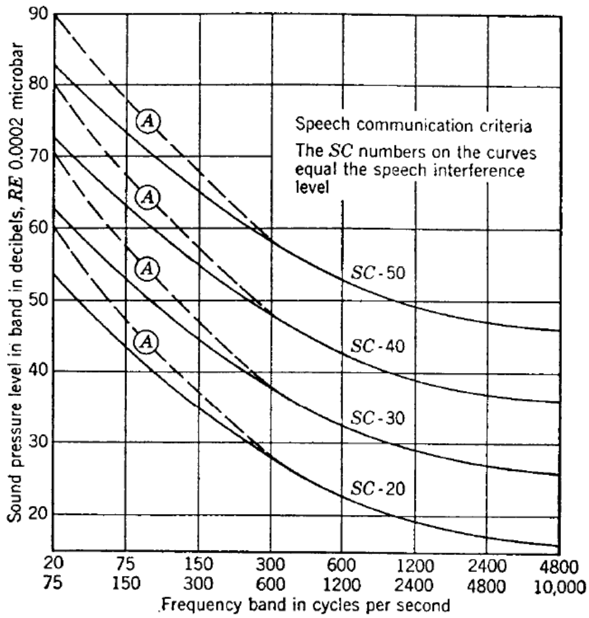
13ـ16 خلفيات الضوضاء في البنايات

إن التخلص من الضوضاء من أهم الاعتبارات عند تصميم الغرف وصالات الاستماع. بواسطة الجدول 13ـ10 والشكل 13ـ29 يمكننا الوصول إلى منحنيات معيار تعطى أقصى مستويات ضوضاء مسموحة عند أى حزمة تردد لغرف من أنواع مختلفة.[40]

على سبيل المثال، في قاعة كبيرة للاجتماعات مع نظام تقوية صوت جيد، نرى من الجدول 13ـ10 أنه يجب اختيار منحنى تواصل خطاب ذات 25 ديسيبل. إذا تركزت الضوضاء في جزء من مدى التردد، فإنه يجب استخدام المنحنى المتصل في الشكل 13ـ29. إذا وقعت مستويات الضوضاء بشكل أساسى بالقرب من المنحنى الملائم في الحزم بين 300 و4800 هيرتز، حينئذ، بسبب تأثيرات الحجب، فإن حزم التردد الثلاثة الأدنى من الممكن أن تكون أعلى. في هذه الحالة، فإن المنحنيات المتقطعة A يمكن أن تستعمل في التصميم. بمعنى أخر، ضوضاء جائزة عند ترددات أقل في وجد ضوضاء حجب تردد عالى تكون أعلى منها في حالة عدم الوجود.

الجدول 13ـ10 معيار السيطرة على الضوضاء [41]

Type of room	SC criterion curve
Broadcast studios	15–20
Concert halls	20–25
Legitimate theaters (500 seats, no amplification)	25
Music rooms	25
Schoolrooms (no amplification)	25
Homes (sleeping areas)	25
Conference room for 50	25
Assembly halls (amplification)	25–30
Conference room for 20	30
Motion-picture theaters	30
Hospitals	30
Churches	30
Courtrooms	30
Libraries	30
Small private office	40
Restaurants	45
Coliseums for sports only (amplification)	50
Secretarial offices (typing)	55
Factories	40–65



الشكل 13ـ29 معايير تواصل الخطاب (SC) والإزعاج للغرف. يؤيد يشير العدد الذي يتلو SC إلى مستوى تداخل لهذا الكنتور لهذا المستوى. المنحنى المتقطع A يعطى مستويات التردد – المنخفض المسموح إذا كانت المستويات في الحزم من 600 إلى 4800 هيرتز تساوي بالفعل مستويات الـ SC المدونة على المنحنى. إذا لم يكن الأمر كذلك، فإن مستويات التردد – المنخفض يجب أن تكون أقل. يجب استخدام هذا المنحنى بالارتباط مع الجدول 13ـ10. [41]

مراجع هذا الباب

1-S. S. Stevens et al., "Handbook of Experimental Psychology," Chaps. 25-28, *John Wiley & Sons, Inc., New York*, 1951.

2- W.A Rosenblith, K.N. Stevens, and the staff of Bolt Beranek and Newman, " Handbook of Acoustic Noise Control," Vol. II, Noise and Man, *WADC Tech. Rept*. 52-104 (June, 1953). Order from Office of Technical Servers, Department of Commerce, Washington, D.C., PB No. 111, 274.

3-I.J. Hirsh, "The Measurement of Hearing," *MeGraw – Hill Book Company, Inc., New York*, 1952.

4-After Wiener, *Physics Today*, 4: 13 (December 1951).

5-After v. Bekesy, *Akust*. Z. 8: 66-76 (1943).

6ـ الضوضاء العشوائى هو كمية صوتية (أى بمعنى، ضغط صوت) أو كمية كهربية (أى بمعنى، جهد) التى تحدث سعاتها اللحظية، كدالة في الزمن طبقا للتوزيع الطبيعى (الجاوسي) للمنحنى. إن الضوضاء العشوائية الشائعة هى التى تنتج بواسطة الحركة العشوائية لجزيئات الهواء. النوع الأخر هو الذي يتولد من الحركة العشوائية للإلكترونات في المقاومة الكهربية. لا تحتاج الضوضاء العشوائية أن يكون لها طيف تردد مسطح (منتظم). الضوضاء البيضاء هى موجة صوتية أو موجة كهربية لها توزيع طاقة متصل ومنتظم كدالة في التردد في مدى التردد المسموع. إن الضوضاء البيضاء ليست عشوائية.

7ـ تم اقتراح مفهوم عرض الحزم الحرجة بواسطة

H. Fletcher, Auditory Patterns, Revs. Of Mod. Phys., 12: 47-65 (1940). Later work was done by J.P.Egan and H.W. Hake, on the Masking Pattern of a simple Auditory Stimuli, *J. Acoust. Soc. Amer*., 22: 622 (1950) and by T.H. Schafar et al. Frequency Selectivity of the Ear as Determined by Masking Experiments, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 22: 490 (1950).

8- After v. Bekesy, *Akust*. Z. 7: 173-186 (1942).

9- After French and Steinberg, *J. Acoust. Soc. Amer.*,19: 90-119 (1947).

10- After Dadson and king, *J. Laryngol. Otologu*, 46: 366-378 (1952), v. Bekesy, *Akust.* Z. 26: 554-566 (1936).

11- *American Standard for noise measurement*, Z24.2-1942.

12- After Wiener and Ross, *J. Acoust. Soc. Amer*., 18: 401-408 (1946).

13- These data are part of the results of the study by a group under the chairmanship of W.A. Rosenblith appointed by *American Standard Association Sectional Committee* Z-24.

14 – After Stevens and Volkman, *Am. J. Psychol*., 53: 329-353 (1940).

15- *American Standard for noise measurement* Z24.2-1942. The dotted lines are equal-loudness contours for bands of noise, 250 mels as determined by Pollack. [Pollack, *J. Acoust. Soc. Amer*. 23: 261-269 (1951)].

16- Beranek, Peterson, Marshall, and Cudworth, *J. Acoust. Soc. Amer., 23*, 261-269 (1951).

17-*J. Inst. Elec. Engrs., (*London), 81: 57-90 (1937).

18- L. L. Berankek, A.P.G. Peterson, J.L. Marshall, and A.L. Cudworth, Calculation and Measurement of the loudness of Sounds, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 23: 261-269 (1951). As can be seen from this reference, calculation of loudness has only limited meaning.

19- After Fletcher, *Revs. Modern Phys*., 12: 47-65 (1940).

20- L. L. Beranek, W.H Radford, J.A. Kessler, and J.B. Wiesner, Speech-reinforcement System Evaluation, *Proc. IRE*. 39: 1401-1408 (1951).

21- R.H. Bolt and A.D. MacDonald, Theory of Speech Masking by Reverberation, *J. Acoust. Soc. Amer*., 21: 577 – 580 (1949).

22- N.R. French and J.C. Steinberg, Factors Govern the Intelligibility of Speech Sounds, *J. Acoust. Soc. Amer*.,19: 90-119 (1947).

23- L.L. Beranek, Design of Speech Communication Systems, Proc. IRE, 35: 880-890 (1947).

24-G.A. Miller, "Language and Communication," *MeGraw-Hill Book Company* (1947).

25- R.K. Potter, G.A. Kopp, and H.C. Green, " Visible Speech," *D. Van Nostrand Company, Inc. NewYork*, 1947.

26- L. L. Beranek, " Acoustic Measurements," pp. 625-635, 761-792, *John Woley & Sons, Inc., New York*, 1949.

27- From Miller, Heise, and Lichten, *J. Exptl. Psychol.*, 41: 329-335 (1951).

28- After *Egann, OSRD Rept*. 3802 (*Nov*. 1, 1944).

29- L. L. Beranek, " Noise Control in Office and Factory Spaced, " *Trans. Bull. 18, 15th Ann. Meeting Chem. Engs. Conf.*, pp. 26-33 (1950).

30- K.D. Kryter, The Effect of Noise on Man, *J. Speech Hearing Disorder, Mon. Suppl. 1* (September, 1950).

31- *Proc. 2d and 3d Ann. Natl. Noise Abatement Symposia*, 2 (1951), 3 (1952), National Noise Abatement Council, New York.

32- L. L. Beranek, Airplane Quieting II-Specification of Acceptable Noise Levels, Trans. ASME, 67: 97-100 (1947).

33- L. L. Beranek and H. W. Rudmose, Sound Control in Airplane, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 19: 357-364 (1947).

34 تتضمن المجموعات الصوتية التى تطور معيار الجوار مؤسسة أرمور للأبحاث، مركز التكنولوجيا بشيكاغو، برانيك ونيومان للاستشارات الصوتية بكامبريدج، ومجموعة أبحاث الصوت، بمختبرات شركات جنيرال أينجنير، وجينرال إلكتريك بنيويورك.

35- After Beranek and Newman, Rating of Noises in Rooms, presented at a meeting of the *Acoustical Society of America, Pennsylvania State College, June* 1950.

36-L.L. Beranek and R.B. Newman, Rating of Noise in Rooms, presented at meeting of the Acoustical Society of America. *Pennsylvania State College*, June, 1950.

37- V.O. Knudsen, " Architectural Acoustic," pp. 408-414, *John Wiley & Sons, Inc., New York,* 1932.

38- V.O. Knudsen and C.M. Harris, "Acoustical Designing in Architecture," pp. 192-195, *John Wiley & Sons, Inc., New York,* 1950.

39- After Bolt and Doak, A tentative Criterion for the Short Term Transient Response of Auditoriumsm, *J. Acoust. Soc. Amer.,* 22: 507-509 (1950).

40- L.L. Beranek, J.L. Reynolds, K.E. Wilson, Apparatus and procedures for Prediction Ventilation System Noise, *J. Acoust. Soc. Amer.*,25: 313-321.

مسائل

الباب الأول

1ـ1 (أ) احسب الطول الموجى بالمتر وبالقدم لصوت فى الهواء عند $72^{o}\,\mathrm{F}$ عند $f=100, \;\; 500\;\mathrm{Hz}$.

(ب) احسب تردد الصوت الذى له طول موجى فى الهواء عند $72^{o}\,\mathrm{F}$ يساوى 1 قدم، و 1 بوصة.

2ـ1 ماهى المعاوقة المميزة للهواء فى م كجم ث للضغط جوى 0.75 م زئبق ودرجة حرارة تساوى 0، 32، 50، 90 درجة فهرنهيت؟

3ـ1 بين كيف تحول النسب التالية إلى الديسيبل بدون استخدام المسطرة الحاسبة أو الجداول الرياضية (أو الآلة الحاسبة). اوجد عدد الديسيبلات كما لو كانت نسب ضغط، ومن ثم كما لو كانت نسب شدة. تذكر أن بالتقريب $\log_{10} 2 \approx 0.3$ و $\log_{10} 3 \approx 0.5$.

(أ) $\dfrac{2}{1}$ (ب) $\dfrac{\sqrt{10}}{200}$ (ج) $\dfrac{30}{1.33}$ (د) $\dfrac{0.002}{1}$ (هـ) $\dfrac{8}{0.05}$

(و) $\dfrac{17.32}{1.6}$. ما هى القيمة الدقيقة $\log_{10} 2$ و $\log_{10} 3$ ؟

4ـ1 ميكروفون ممتص بمكبر له مقاومة دخل 500 أوم. تم توصيل خرج المكبر بسماعة غير موجهة لها مقاومة كهربية 32 أوم. إذا ولد المكبر 11 فولت (ج م م) عبر أطراف السماعة عندما يولد الميكروفون 0.013 فولت (ج م م) عبر دخل المكبر، فما كسب القدرة بالديسيبل للمكبر؟ وما كسب الجهد؟

5ـ1 تم قياس مستوى شدة صوت مقدارها $70\mathrm{db}\; re\, 10^{-16}\;\;\mathrm{watt/cm^{2}}$ عند 100 قدم من سماعة غير موجهة. ماذا تكون القدرة الكلية المشعة بواسطة السماعة؟ أوجد شدة الصوت ومستوى شدة الصوت عند مسافة تساوى 200 قدم.

6ـ1 بفرض n من الأصوات لها مستوى شدة صوت مختلفة $\mathrm{IL_n}$ ، اوجد مستوى شدة الصوت الكلية $\mathrm{IL_T}$ (افترض أن شدة الأصوات المختلفة تجمع حسابيا).

7ـ1 بفرض أن مستوى شدة الصوت ($re\ 10^{-16}$ watt/cm^2) لكل من الأصوات المختلفة عند موضع معين فى الخلاء يعطى فيما يلى.

Sound	*db*
A	68
B	73
C	60
D	70

ما قيمة مستوى شدة الصوت الكلية نتيجة كل هذه الأصوات؟

8ـ1 بمعلومية مستويات الضوضاء المقاسة فى حزم التردد المدونة أدناه لطائرة لها طيف ضوضاء متصل، احسب مستوى الطيف (مستوى ضغط الصوت بالديسيبل لحزم عرض كل منها دورة واحدة) للضوضاء فى كل حزمة، مفترضا أن الضوضاء تكون منتظمة خلال كل حزمة. ارسم النقطة المرجعية لكل حزمة على ورقة نصف لوغاريتمية دورتان عند تردد المتوسط الهندسى f_g لهذه الحزمة، بمعنى $f_g = \sqrt{f_1 f_2} = 1.4 f_1$ وصل بين النقط بمنحنى.

تردد الحزمة، ترددات القطع بالهيرتز f_1	f_2	مستوى ضغط الصوت بالديسيبل، re 0.0002 microbar
75	**150**	**95**
150	**300**	**101**
300	**600**	**97**
600	**1200**	**91**
1200	**2400**	**86**
2400	**4800**	**79**
4800	**9600**	**70**

9ـ1 تم تدوين مستويات طيف ضوضاء ضيف ممتص فى الجدول المبين أدناه لمدى التردد من 100 إلى 2500 هيرتز. تم استخدام محلل له حزم نصف – أوكتاف لقياس هذه الضوضاء، نقطة البيان لكل حزمة تكون عبارة عن تردد المتوسط الهندسى. عين قراءات مساوى الضوضاء التى تم الحصول عليها فى حزم متتالية نصف – أوكتاف، التى تبدأ بالحزم 100ـ141، 200ـ282، وهكذا. لاحظ أن كل حزمة يكون لها عرض يمتد من f إلى $\sqrt{2}\,f$ و المتوسط الهندسى يساوى $\sqrt[4]{2}\,f$.

Frequency, cps	*Spectrum level, db, re 0.0002 dyne/cm²*
100	84
200	85
300	82
500	80
700	77
1000	71
1500	66
2000	62
2500	57

10ـ1 يقاس طيف ضوضاء بمحلل راديوى عام. لهذا المحلل مرشح له تردد متوسط يتغير بشكل متصل وعرض حزمة يساوى $0.02\,f$. حول مستويات ضغط الصوت المقاسة (re 0.0002 microbar) إلى مستويات طيف. ارسم منحنى مستوى الطيف مقابل التردد على ورقة نصف لوغاريتمية دورتان.

Frequency, cps	*Measured sound pressure levels, db*
75	72
150	75
300	78
700	74
1100	69
2200	63
4800	59
7500	53

11ـ1 ارسم مستوى طيف (ارسم الديسيبل لعرض حزمة 1 هيرتز مقابل التردد على ورقة نصف لوغاريتمية دورتان) للضوضاء الكهربية التى سوف تولد خرج 0.1 فولت لا يعتمد على التردد، من المرشحات التامة التالية. كمستوى جهد مرجعى استخدم 1 فولت.

(أ) محلل صوت من نوع عرض الحزمة الثابت – النسبة المئوية. لهذا الجهاز عرض حزمة يساوى $0.02\,f$ ، حيث f هو التردد التى يتم ضبط (توليف) المحلل عليه.

(ب) محلل موجة من نوع عرض الحزمة – الثابت. لهذا الجهاز عرض حزمة يساوى 3 هيرتز.

(ج) مجموعة مرشح – أوكتاف مع الحزم المتتالية الأتية.

Limiting frequencies of the bands, cps
75–150
150–300
300–600
600–1200
1200–2400
2400–4800
4800–9600

فى الحالة (ج) ارسم البيانات عند تردد المتوسط الهندسى لكل حزمة، بمعنى $f_g = \sqrt{f_1 f_2}$.

12ـ1 طلب منك قياس طيف ضوضاء متصل يمتد على طول منطقة التردد من 20 إلى 15000 هيرتز. وجدت أن ذلك يتطلب محللين إثنين، واحد للمدى من 20 إلى 5000 هيرتز والأخر من 5000 إلى 15000هيرتز. يكون عرض حزمة محلل التردد المنخفض ثابت وتساوى 100 هيرتز. يكون عرض حزمة المحلل الأخر يتغير كدالة فى التردد ويساوى $0.01\,f$ ، حيث ب تردد منتصف – الحزمة. إذا حصلت على البيانات التالية، فما القيم التى سوف ترسمها على منحنى مستوى الطيف مقابل التردد؟

محلل التردد – المنخفض		محلل التردد ـ العالى	
SPL	f	SPL	f
60	100	65	5000
63	200	66	6000
64	2000	67	7000
68	4000	69	10,000

13ـ1 تنتقل موجة صوت فى غرفة. عند نقطة معينة يكون ضغط الصوت 1.4 بزاوية 30 درجة وسرعة الجسيم تكون 0.02 بزاوية ـ30 درجة. أوجد المعاوقة التوعية للصوت.

14ـ1مصدر صوت موضوع فى خلاء. تم عمل سلسلة من 12 قياسه لمستوى الشدة عند 12 نقطة على سطح كروي افتراضي نصف قطره 10 متر والمصدر موضوع فى مركزة. تقع نقط القياس عند مراكز المساحات المتساوية التى تقسم السطح إلى 12 جزء. القراءات الاثني عشر لمستويات الشدة كانت على النحو 90، 89، 88، 87، 86، 85، 84، 83، 82، 81، 80، و 70 ديسيبل مع مرجع $re10^{-16}$ watt/cm^2 . بفرض أن شدة الصوت تكون منتظمة على كل

جزء، احسب (أ) القدرة الكلية المشعة بالمصدر، (ب) مستوى القدرة، (ج) الشدة المتوسطة، (د) ضغط الصوت المتوسط، و (هـ) مستوى ضغط الصوت المتوسط. (مساحة الكرة تساوى $4\pi r^2$).

الباب الثانى

1-2 على مخطط الضغط المعتاد مقابل الحجم (مخطط PV)، ارسم تغير حجم من الغاز التام فى أسطوانة عندما يدفع مكبس يغلق احدى نهايتى الأنبوبة بحيث تكون إزاحته كدالة فى الزمن عارة عن موجة مربعة. ما القدرة المتبددة بالواط بواسطة حركة المكبس عند أى تردد متكرر f ؟ (يقبل حل بيانى نموذجى). إذا كانت القدرة تتبدد فأين تذهب؟

2-12 أنبوبة أسطوانية لها نصف قطر 3سم مغلقة من إحدى طرفيها. يكون قطر هذه الأنبوبة صغير مقارنة مع الطول الموجى للصوت فيها، الأمر الذي يعنى وجود موجات مستوية فقط. إذا كان طول الأنبوبة 38 سم، احسب المعاوقة الصوتية، المعاوقة الصوتية النوعية، والمعاوقة الميكانيكية عند الطرف المفتوح عند الترددات 60، 110، 490 هيرتز. ماذا يكون خطأ النسبة المئوية إذا تم عمل الحسابات عند 60 هيرتز، باستخدام المعادلة التقريبية (حد – واحد من مفكوك ظل التمام) لمعاوقة الأنبوبة القصيرة؟

3-2 أنبوبة أسطوانية لها الطول L مع نهاية مفتوحة والأخرى مغلقة بمكبس له السرعة $U_o e^{j\omega t}$. قطر الأنبوبة مقارنة مع الطول الموجى للصوت فيها، الأمر الذي يعنى وجود موجات مستوية فقط. افترض أن قدرة صوتية صغيرة لدرجة الإهمال تشع من الطرف المفتوح، وبالتالى يكون ضغط الصوت عند هذه النهاية صفر تقريبا. حل معادلة الموجة فى بعد –واحد عند هذه الظروف واستنتج تعبير للمعاوقة الصوتية النوعية عند النظر للأنبوبة من طرف المكبس.

4-2 للأنبوبة الموصوفة فى الشكل 2-3 مفاعلة صوتية نوعية 500 mks rayls – عند المستوى x_o على امتداد طولها عند 1000 هيرتز. ما المفاعلة الصوتية النوعية عند قيم X الأكبر من x_o بمقدار 0.05، 0.10، و 0.20 متر؟

5-2 كيف يتغير مستوى ضغط الصوت فى موجة مستوية تتحرك بحرية مع تغير درجة الحرارة من

0 إلى 1000 درجة مئوية عند ثبوت مستوى الشدة عند 100 ديسيبل؟

6.2 مصدر نقطى يعمل عند 1000 هيرتز يشع 1 واط صوتى. عين عند المسافة 10 متر (أ) شدة الصوت، (ب) ضغط الصوت، (ج) مستوى ضغط الصوت، (د) ج م م سرعة الجسيم، (هـ) ج م م إزاحة الجسيم، (و) ج م م الكثافة التزايدية، و (ح) ج م م درجة الحرارة التزايدية.

7.2 قيس مستوى شدة صوت 80 ديسيبل عند 10 متر من مصدر كروى يشع الصوت فى فضاء حر عند 100 هيرتز. ما هى القدرة الكلية المشعة فى كل الاتجاهات؟ ما قيمة مستوى القدرة؟ فى هذه الحالة ارسم مستوى الشدة بالديسيبل كدالة فى المسافة r على المحور اللوغاريتمى. كم يكون عدد الديسيبلات التى سوف يتناقصها مستوى الشدة لكل مضاعفة مسافة؟ هل سيتناقص مستوى ضغط الصوت بنفس المعدل؟

8.2 ناقش تغير شدة الصوت وكثافة الطاقة مع المسافة r فى الموجة الكروية التى تتقدم بحرية. إذا كانت تلك الكميات تتغير بشكل مختلف، اشرح المعنى الفيزيائى للفرق فى التغيرات.

9.2 بفرض أن معادلة الموجة فى بعد – واحد فى المحاور الأسطوانية على الصورة،

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\,\frac{\partial p}{\partial r}=\frac{1}{c^2}\,\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

هنا، افترضنا أن الضغط لا يعتمد على المحاور θ، z وتعتمد على r و t. بين أن

$$p=\frac{P_o\,e^{jk(ct\pm r)}}{\sqrt{r}}$$

تحقق هذه المعادلة عند $4r^2k^2>>1$. ما معنى الإشارة $\pm$ فى الأس؟

10.2 اوجد المعاوقة الصوتية النوعية عند المسافة r من المحور على امتداد المصدر الأسطواني. افترض أن المصدر يولد مجال صوت تقريبي له الصورة،

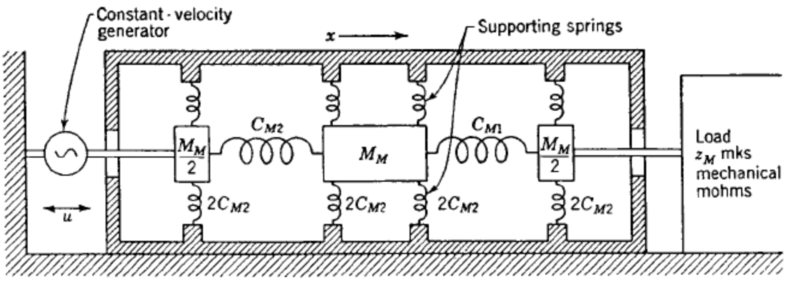
$$p=\frac{P_o\,e^{jk(ct-r)}}{\sqrt{r}}$$

إلى أى قيمة سوف تختزل المعاوقة عند $4r^2k^2>>1$. انظر الجدول 1.2 للحصول على u فى

الحالة الثابتة. استبدل x بـ r فى معادلة الحركة.

الباب الثالث

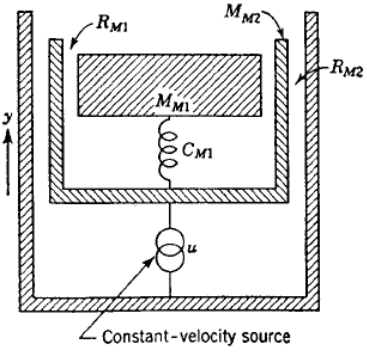
1ـ3حول النظام الميكانيكى المبين بالشكل م 1ـ3 إلى دائرة من نوع – الحركية و إلى دائرة من نوع – المعاوقة. تكون الحركة ممكنة فقط على امتداد محور x . لزنبركيات التعليق مطاوعة كلية تساوى $2M_{M2}$ عند كل من الأماكن الأربعة التى تحدث عندها.



الشكل م 1ـ3

2ـ3 (أ) ارسم للنظام الميكانيكى المبين بالشكل م 2ـ3 الدائرة من نوع – الحركية و الدائرة من نوع – المعاوقة مع العلم بأن الحركة تكون ممكنة فقط على امتداد محور y .

(ب) إذا كان مصدر السرعة الثابتة u يمثل بالعلاقة $u = \sqrt{2}|u_{rms}|\cos \omega t$ ، اوجد ج م م مقدار وطور (نسبة إلى u) سرعة الكتلة M_{M1} .



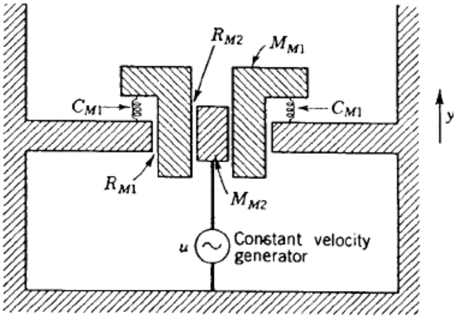
الشكل م 2ـ3

3ـ3 فى مخطط النظام الميكانيكى المبين فى الشكل م 3ـ3، تكون الكتلة M_{M1} معلقة

بزنبركات أربعة لكل منها مطاوعة C_{M1} . المقاومة الميكانيكية R_{M2} تمثل الاحتكاك الكلى بين M_{M1} و M_{M2} . إذا كانت الحركة ممكنة فقط على امتداد المحور y :

(أ) ارسم المخطط الميكانيكى. (ب) ارسم الدائرة من نوع – الحركية.

(ج) ارسم الدائرة من نوع – المعاوقة. (د) إذا كان المولد الثابت –السرعة يمثل بالعلاقة $u = \sqrt{2}\, A\cos\, \omega t$ ، عين التردد الذى عنده ستكون سرعة الكتلة M_{M1} قيمة عظمى، بفرض أن R_{M1} تكون صغيرة جدا.

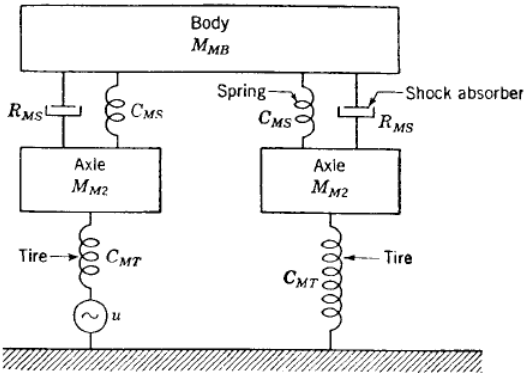


الشكل م 3ـ3

يبين الشكل م 3ـ4 رسم مثالى لسيارة. بفرض أن أحد العجلات تمر فوق سلسلة من الحفر تكسب الإطار سرعة رأسية، تعطى بالعلاقة،

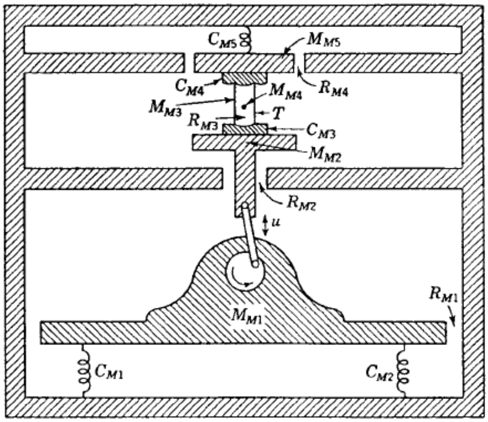
$$u = \sqrt{2}\, u_o \sin\, \omega t$$

بفرض أن الحركة الرأسية فقط هى الممكنة، ارسم الدوائر من نوع – الحركية ومن نوع المعاوقة.



الشكل م 4.3

5.3 ارسم الدائرة من نوع – الحركية للهزاز المبين فى الشكل م 5.3. بين على المخطط السرعة u_p لجسيم صغير M_{M4} يسقط خلال سائل لزج موجود فى أنبوبة اختبار T. كتلة جدار أنبوبة الاختبار هى M_{M3}. تكون المقاومة الميكانيكية بين الجسيم وجدران أنبوبة الاختبار هى R_{M3}. أهمل السرعة المستمرة (d-c) الصغيرة لأسفل للجسيم الصغير. كون الدوائر من نوع – الحركية ومن نوع – المعاوقة بفرض أن $C_{M1} = C_{M2}$.



الشكل م 5.3

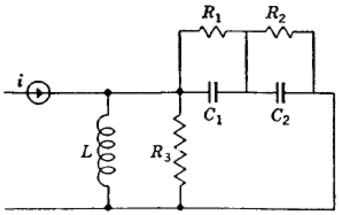
6.3 (أ) ارسم الدائرة من نوع – الحركية ومخطط النظام الميكانيكى الذى سوف تكون له الدائرة الكهربية المناظرة المبينة فى الشكل م 6.3، حيث i هو مناظر القوة f.

(ب) أين يجب وضع نقطة الأرضى لهذه الدائرة لكى يتحقق النظام الميكانيكى بشكل

فيزيائى؟

(ج) حدد مقدار كل عنصر ميكانيكى بدلالة الثوابت المعطاة فى الدائرة السابقة وبين اين وفى أين اتجاه تؤثر القوة f .

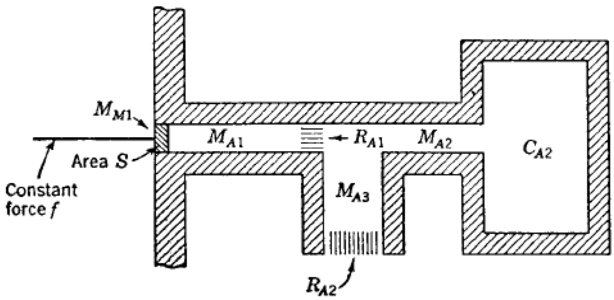
(د) احصل على مزدوج الدائرة الكهربية. سمى عناصر المزدوج بدلالة الدائرة المعطاة.



الشكل م 3ـ6

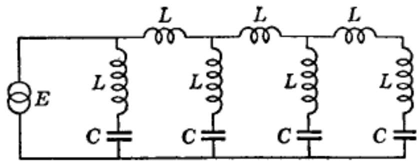
7ـ3 (أ) باستخدام التناظر من نوع – المعاوقة ارسم دائرة للنظام الصوتى المبين فى الشكل م 3ـ7، حيث M_{M1} بوحدات كجم، M_{A1}، M_{A2}، و M_{A3} تكون بوحدات كجم/م[4]، C_{A2} بوحدات م^5/نيوتن، و R_{A1} و R_{A2} بوحدات الأوم الصوتى فى نظام م كجم ث.

(ب) حول هذه الدائرة إلى دائرة من نوع – الحركية.



الشكل م 3ـ7

8ـ3 ارسم المخطط الصوتى القابل للتحقيق للمرشح الكهربي المبين فى الشكل م 3ـ8. بين المكافئ الصوتى لوضع حمل مقاومى عبر فرع LC الأخير.



الشكل م 8ـ3

9ـ3 فى الجهاز الموصوف فى المسألة 2ـ3 حجوم العنصر التالية:

$$M_{M1} = 0.01 \text{ kg}$$
$$M_{M2} = 0.02 \text{ kg}$$
$$C_{M1} = 10^{-3} \text{ m/newton}$$
$$R_{M1} = 1 \text{ mks mechanical ohm}$$
$$R_{M2} = 2 \text{ mks mechanical ohms}$$

إذا كان لمولد السرعة التردد 100 قطرى/ث وله سرعة تساوى 1م/ث، اوجد القدرة الفاعلة والقدرة المفاعلة لكل عنصر، واوجد القدرة الكلية الفاعلة والمفاعلة.

10ـ3 الجهاز الموصوف فى المسألة 7ـ3 له الثوابت التالية:

$$M_{M1} = 0.001 \text{ kg}$$
$$S = 3 \text{ cm}^2$$
$$M_{A1} = 0.001 \text{ kg/m}^4$$
$$R_{A1} = 10 \text{ mks acoustic ohms}$$
$$M_{A3} = 0.002 \text{ kg/m}^4$$
$$M_{A2} = 0.003 \text{ kg/m}^4$$
$$R_{A2} = 20 \text{ mks acoustic ohms}$$
$$C_{A2} = 10^{-7} \text{ m}^5\text{/newton}$$

إذا كان للمولد تردد 1000 هيرتز و ج م م قوة يساوى 1 نيوتن، عين القدرة الفاعلة والقدرة المفاعلة لكل عنصر، و اوجد القدرة الكلية الفاعلة والمفاعلة .

الباب الرابع

1ـ4 تعمل سماعة صغيرة جدا موضوعة فى حاجز صغير مغلق كمصدر كروي بسيط له نفس المساحة عند الترددات المنخفضة. إذا كانت ج م م سعة حركة المصدر (معنى ج م م الإزاحة) هو 0.1 سم وقطره 10 سم، عين: ـ

(أ) ضغط الصوت عند 1 م، (ب) الشدة عند 1 م، (ج) القدرة الكلية المشعة، (د) مستوى ضغط الصوت، ومستوى القدرة الصوتية.

2.4 مستوى القدرة الصوتية لمصدر غير موجهه يساوى 130 ديسيبل. أوجد، عند مسافة 70 قدم: ـ (أ) الشدة، (ب) ضغط الصوت، (ج) مستوى ضغط الصوت. أوجد أيضا الإزاحة من القمة ـ إلى – القمة عند 100 هيرتز للمصدر الكروى إذا كان نصف القطر يساوى 0.5 قدم.

3.4 حقق أدلة التوجيهية المعطاة فى الشكل 5.4 للحالات $\frac{\lambda}{2}$، λ، و $\frac{3\lambda}{2}$. افترض أن محور 0^o هو محور التماثل الفضاء الثلاثى – الأبعاد.

4.4 بالنسبة للمصدر الموصوف فى الشكل 11.4 عين مستوى ضغط الصوت عند 3 م على المحور $\theta = 0$ فى حالة ka تساوى 0.5، 1.0، 2.0، و 3.0 مع $\text{PWL} = 130\text{db } re\ 10^{-13} \text{ watt}$

5.4 احسب معامل ودليل التوجيهية لميكروفون من البيانات التالية عند 3000 هيرتز:

θ, deg	*Output voltage level minus output voltage level at θ = 0°, db*
0– 30	0
30– 60	−10
60– 90	−20
90–120	−30
120–150	−40
150–180	−30

6.4 بمعلومة سماعة لها السمات التوجيهية التالية عند التردد 2000 هيرتز احسب معامل التوجيهية Q و دليل التوجيهية DI.

θ, deg	*Acoustic response in db relative to acoustic response at θ = 0°*
0– 10	0
10– 20	− 1.5
20– 30	− 6.0
30– 40	−10.0
40– 50	−17.0
50– 60	−19
60– 70	−21
70– 80	−22
80– 90	−23
90–100	−25
100–110	−27
110–120	−29
120–130	−32
130–140	−47
140–150	−35
150–160	−30
160–170	−29
170–180	−27

افترض أنه عند تردد 2000 هيرتز يكون مستوى الضغط المقاس عند مسافة 15 قدم من

السماعة فى غرفة عديمة الصدى يساوى 111db *re* 0.0002 microbar لقدرة دخل كهربية متاحة 50 واط. ما كفاءة القدرة المتاحة (PAE) بالديسيبل عند 15 قدم؟ هل ستختلف الإجابة عند افتراض أن المسافة 40 قدم اساس للحسابات، بفرض، كما سبق، أن 111 ديسيبل كانت المستوى المقاس عند 15 قدم؟

الباب الخامس

1ـ5 سماعة متماثلة مثبتة فى حائط بين غرفتين عديمتا الصدى. نصف قطر السماعة 0.1 م و ج م م سرعة الحجاب الحاجز يساوى 1سم/ث. عين القدرة الصوتية الكلية المشعة عند 100 و 1000 هيرتز. عين الشدة على محور السماعة عند مسافة 3 م عند 1000 هيرتز، مع الأخذ فى الاعتبار التوجيهية.

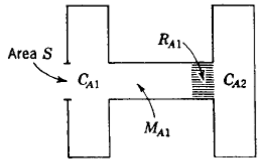
2ـ5 بفرض أن المصدر الموصوف فى الشكل 11ـ4 له نصف قطر 30 سم وأدلة توجيهية المعطاة فى الأشكال 12ـ4 و 20ـ4. احسب للحالات (أ) و (ز) المبينة فى الشكل 12ـ4 ج م م سرعة الحجاب اللازمة لتوليد مستوى ضغط صوت ثابت مقداره 100 ديسيبل عند مسافة 10 قدم على المحور $\theta = 0^o$.

3ـ5 مكبس نصف قطره a فى حاجز لانهائى يهتز بـ ج م م السرعة u. عند $\omega_i = \frac{1}{2}\frac{c}{a}$ تكون القدرة المشعة هى $(0.12)\,\pi a^2 \rho_o c u^2$. بالتقريب، ما القدرة المشعة عند $\omega_2 = \frac{1}{10}\omega_1$ عند $\omega_2 = 10\omega_1$، بفرض أن u تظل بدون تغيير؟

4ـ5 الجهاز المبين فى الشكل م 4ـ5 يستخدم كحمل على أحد جوانب حجاب محول طاقة.

(أ) ارسم الدائرة الصوتية من نوع – المعاوقة.

(ب) غير مخطط الدائرة بحيث يمكن إقرانها خلال المساحة S مع دائرة ميكانيكية من نوع – الحركية.

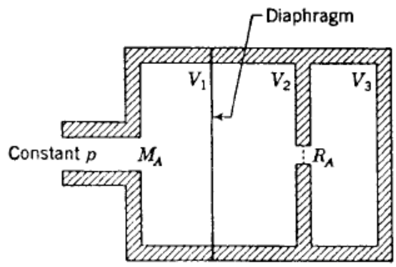


الشكل م 4.5

(ج) اقرن (اربط) محول طاقة كهروستاتيكي له المساحة S . افترض أن له سعة كهربية C_E ، ثابت الربط τ ، ومطاوعة ميكانيكية C_M (انظر الشكل 37.3).

(د) إقرن (اربط) محول طاقة كهرومغناطيسى له المساحة S . افترض أن له معاوقة اللفات الكهربية Z_E ، ثابت الربط BL ، وحجاب له كتلة M_M (انظر الشكل 35.3).

5.5 ارسم مخطط للدائرة الميكانيكية للنظام الصوتميكانيكى المبين فى الشكل م 5.5. الحجوم V_1 ، V_2 ، و V_3 ، والمقاومة والكتلة الصوتية R_A و M_A على الترتيب، الكتلة الميكانيكية الفعالة M_M ، والمطاوعة الميكانيكية C_M ومساحة الحجاب S كلها بوحدات النظام م كجم ث.



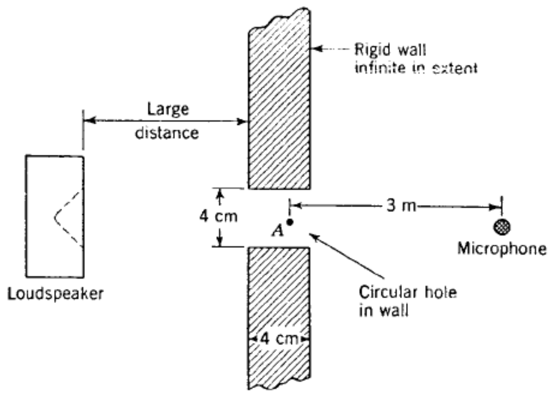
الشكل م 5.5

6.5 حجاب سماعة له تجويف هوائى خلفه ومرنان متصل مع أحد جوانب التجويف. اوجد حمل المعاوقة الميكانيكية عند 100 هيرتز على الطرف الخلفى للحجاب إذا كانت مساحة الحجاب 50 سم^2، وحجم تجويف الهواء خلف الحجاب 1000 سم^3، والمرنان يتكون أنبوبة طولها 5سم وقطر 2 سم متصلة مع الحجم الثانى 100 سم^3.

7.5 سماعة وميكروفون موضوعان بشكل متقابل على فتحة دائرية فى حائط تام الصلابة كما هو مبين بالشكل م 7.5. يمكن اعتبار أن الحائط ممتد إلى ما لانهاية فى جميع

الاتجاهات. عند سد الفتحة بمادة صلبة فإن السماعة تولد ضغط p يساوى $94\text{db}\ re\ 0.0002\ \text{dyne/cm}^2$ على السطح اليمين للحائط عند تردد 500 هيرتز.

(أ) احسب القدرة التى تنفذ من الفتحة على جانب الحائط ناحية الميكروفون عندما تكون الفتحة مفتوحة.

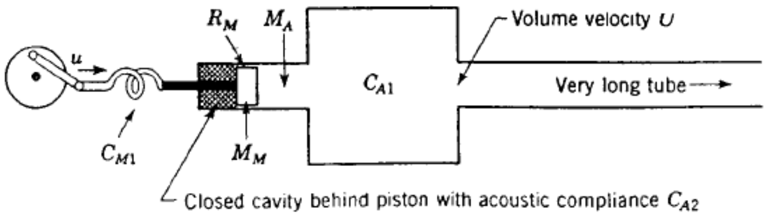


الشكل م 5ـ7

(ب) بفرض أن موجة نصف كروية (تتمركز عند A) تنتقل إلى الجدار الصلب، احسب جهد الدائرة – المفتوحة للميكروفون، بفرض ان له حساسية $-50\text{db}\ re\ 1\ \text{volt}$ لضغط صوت واحد ميكروبار.

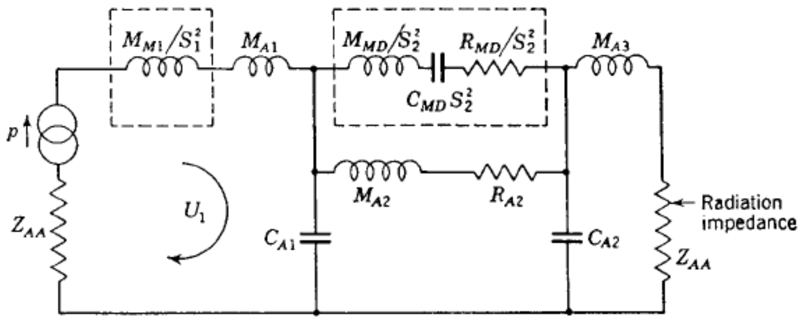
(ج) كيف يتغير جهد الدائرة – المفتوحة للميكروفون مع تناقص التردد؟ افترض أن p (عند سد الفتحة) يبقى عند $94\text{db}\ re\ 0.0002\ \text{dyne/cm}^2$ وأن جهد الميكروفون يكون كما هو عند كل الترددات إذا كان فى مجال صوت ثابت الضغط.

8ـ5 ارسم الدائرة المكافئة للجهاز المبين فى الشكل م5ـ8 فى تناظر كل من نوع – الحركية و نوع – المعاوقة. تكون مساحة الأنابيب الموجودة على يمين و يسار التجويف هى S. افترض أن الجهاز يمكن أن يمثل بعناصر مجتمعة وافترض أنه يمكن إهمال تصحيحات النهاية. بين السرعة الحجمية للحجاب U على رسمك.



الشكل م 5ـ8

9ـ5 الشكل م 5ـ9 هو دائرة مناظرة لنظام ميكانوصوتى. العناصر الموجودة فى المربعات المنقطة هى عناصر ميكانيكية. ارسم الشكل (الترتيب) الممكن للعناصر الصوتية والميكانيكية التى لها دائرة مناظرة مثل المبينة فى الشكل.



الشكل م 5ـ9

10ـ5 عنصر صوتى مصنوع من لوح مثقب له سمك 0.0025 م و مساحة 0.01 م^2 ومطلوب أن يكون له $Q_A = 2.0$ و كتلة صوتية 135 كجم/م^4 عند تردد زاوى 100 قطرى / ث. اوجد عدد الثقوب المطلوبة فى مثل هذا العنصر. ملحوظة: افترض أن الكسر الكبير الموجود على الطرف الأيمن من المعادلة 5ـ58 يساوى الوحدة تقريبا. افترض أن $(1-a/b) \approx 1$ فى المعادلة 5ـ57 يساوى الوحدة تقريبا. فى النهاية، افحص النسبة المئوية للخطأ فى Q_A و M_A بسبب هذه الافتراضات. لاحظ أيضا أن عدد الفتحات n يساوى المساحة مقسومة على b^2.

الباب السادس

1ـ6 ميكروفون ملف – متحرك له حجاب مساحته 5 سم^2. عند استبدال هذا الحجاب بقالب صلب من الصلب له نفس الشكل فإن ضغط الصوت المتولد عند 500 هيرتز عند سطحه فى الفضاء

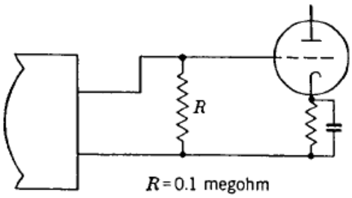
الحر بواسطة مصدر معين يكون 1 داين/سم^2. تكون المعاوقة الصوتية للحجاب (عندما يكون موضوع فى الميكروفون) كما تقاس عند سطحه الخارجى هى $(20 + j20)$ cgs acoustic ohms. ما هو ضغط الصوت الذي يتولد عند سطح الحجاب؟

2.6 مصدر صوت بمعاوقة ميكانيكية عالية جدا مزروع فى السطح الداخلى لتجويف مغلق. للتجويف حجم 20 سم^3. تم زرع ميكروفون له معاوقة حجاب مقدارها $200 - j(10^6 / \omega)$ cgs acoustic ohms فى جزء أخر من السطح الداخلى. إذا كان حجاب المصدر له ج م م إزاحة يساوى 0.05 سم^2، فما ج م م السرعة المركبة لحجاب الميكروفون عند 500 هيرتز إذا كان له مساحة تساوى 4 سم^2.

3.6 استجابة ميكروفون مكثف تساوى $-52\text{db } re1 \text{ volt}$ لضغط صوت 1 ميكروبار عند الحجاب. السعة عندما يعرض حجاب الميكروفون للهواء ($p_D \approx 0$) تساوى 50 ميكرو ميكروفاراد. السعة عندما يكون حجاب الميكروفون معاق (ممنوع) ($u_D \approx 0$) تساوى 48 ميكرو ميكروفاراد. بفرض أن حجم الهواء خلف الحجاب يساوى 0.2 سم^3 ومساحة الحجاب 3 سم^2، ارسم الدائرة المكافئة للميكروفون عند الترددات المنخفضة وعين قيم العناصر بوحدات النظام م كجم ث.

4.6 ميكروفون مكثف له حجاب منساب (يتدفق) بواسطة جانب واحد لتجويف له المميزات التالية: مطاوعة الحجاب 5×10^{-4} m/newton، مطاوعة الهواء خلف الحجاب 2.2×10^{-5} m/newton، جهد الاستقطاب يساوى 200 فولت، المسافة بين الحجاب واللوح الخلفى تساوى 10^{-4} m، مساحة الحجاب تساوى 3 سم^2، المطاوعة الكهربية للميكروفون تساوى 35 ميكرو ميكروفاراد، و مقاومة الحمل تساوى 20 ميجا أوم. أهمل كتلة ومقاومة الحجاب. مكبس ثابت – السرعة مزروع فى أحد جوانب التجويف يولد ضغط 0.1 نيوتن/م^2 خلال التجويف عند تثبيت حجاب الميكروفون بحيث لا يستطيع التحرك. بفرض أن المطاوعة الميكانيكية للتجويف تساوى 9×10^{-3} m/newton، احسب الجهد عبر مقاومة الحمل عند تردد زاوى يساوى 3000 قطرى/ث.

5ـ6 ميكروفون بلورى من النوع المبين فى الشكل 40ـ6 يستخدم فى الدائرة المبينة فى الشكل م5ـ6. يكون عنصر بلورة ملح – روشيل المقطوع فى محور –X مثل المبين فى الشكل 35ـ6أ، وله الأبعاد $in.\ {}^{1}\!/_{16} \times 1 \times 1$. الألواح تتصل كهربيا على التوازى. بفرض أنه عند ضغط صوت معين يولد الميكروفون مستوى جهد الدائرة – المفتوحة يساوى $-60\,\text{db}\ re\ 1\ \text{volt}$ عند ترددات 100 و 1000 هيرتز و درجة حرارة $T = 40^{o}\,\text{C}$. ماذا ستكون مستويات الجهد عند نفس التردد إذا ظل ضغط الصوت ثابت وتم تغيير درجة الحرارة إلى القيم 10، 25، 30 درجة مئوية؟



الشكل م 5ـ6

6ـ6 وحدة تيتانات الباريوم تستخدم كميكروفون. بفرض أن الوحدة يجب أن تكون من نوع ثنائى الشكل المثنى، المتصل على التوالى. وبفرض أن الطول 10 سم، والعرض 2.5 سم، والسمك 0.2 سم، عين جهد الدائرة – المفتوحة المتولد بواسطة الميكروفون عند تطبيق ج م م قوة 0.01 نيوتن عند $\omega = 1000\ \text{radians/sec}$ على المكان المناسب على ثنائى الشكل المثنى.

7ـ6 طلب تصميم عملى لميكروفون ضغطى من نوع بلورة ملح-روشيل يعمل بحجاب الأمونيوم متصل مع أحد أركان بلورة ثنائى شكل عزمى مربع مصنوعة من لوح قصي مقطوع فى محور X (انظر الشكل 40ـ6). تكون الثوابت الفيزيائية على النحو التالى: قطر الحجاب 4 سم، كتلة الحجاب $5\times10^{-4}\ \text{kg}$، مطاوعة الحجاب $4.5\times10^{-4}\ \text{m/newton}$، مساحة البلورة 1 سم^2، سمك البلورة 2 مم، و حجم التجويف خلف الحجاب يساوى $10^{-5}\ \text{m}^3$. الألواح تتصل كهربيا على التوازى. بإهمال التجويف بين الحجاب واللوح المتكس.

(أ) احسب حساسية ضغط الدائرة – المفتوحة للتردد – المنخفض بالديسيبل مع مرجع 1 فولت لكل ميكروبار، مع إهمال تأثير اللوح المعدنى المتكلس.

(ب) بإهمال حمل الهواء، احسب تردد الرنين للدائرة – المفتوحة للأطراف الكهربية.

(ج) ماذا سيكون تأثير تخفيض حجم التجويف خاف الحجاب على حساسية واستجابة الرنين؟

الباب السابع

1.7 سماعة صغيرة بمشعاع – مباشر تستخدم كميكروفون وكسماعة فى مجموعة اتصال داخلى. تم معايرة السماعة كميكرفون فى منتصف منطقة التردد المسموع حيث، بشكل تقريبى، يمكن إهمال كل مفاعلات الكتل والجسوء (الصلابة) وتكون معاوقة الإشعاع النوعية على كل من جانبى الحجاب $\rho_o c$.

إذا كانت حساسية المجال – الحر للدائرة – المفتوحة كميكروفون هى $-80\,\text{db}\ re\ 1\,\text{volt}$ ضغط صوت الحجاب المثبت يساوى 0.1 نيوتن/م^2، فما الكفاءة المتاحة لأقصى قدرة للجهاز الذى يعمل كسماعة، باعتبار أن مقاومة المولد 0.2 أوم ويشع فى نصف الفضاء. د ع مقاومة ملف – الصوت $R_{ED} = 0.2\,\text{ohms}$ ، كثافة فيض فجوة الهواء $B = 2.2\,\text{weber/m}^2$ ، طول سلك الملف $l = 2\,\text{m}$ ، ونصف القطر الفعال 0.04 متر.

2.7 مطلوب شبكة مكبرات الصوت لها كسب كلى عند 1000 هيرتز مقداره 15 ديسيبل. هنا، كسب النظام يساوى 20 مرة قدر اللوغاريتم للأساس 10 للنسبة بين ضغط الصوت المتولد عند مسافة 50 قدم بواسطة سماعة فى غرفة عديمة الصدى وضغط الصوت المتولد عند الميكروفون بواسطة الشخص المتحدث. لديك ميكروفون له حساسية الدائرة – المفتوحة للمجال الحر تساوى -90 ديسيبل أسفل 1 فولت لكل ميكروبار ومقاومة داخلية مقدارها 30 أوم. لديك أيضا سماعة لها استجابة أقصى قدرة متاحة مقداها $96\,\text{db}\ re\ 0.0002\,\text{microbar}$ و 1 واط مقاس عند 1000 هيرتز عند 20 قدم. معاوقة السماعة $8 + j0$ أوم وللمكبر معاوقة دخل تساوى $30 + j0$ أوم ومعاوقة خرج تساوى $26 + j0$ أوم. ما كسب قدرة المعاوقة – المتوافقة بالديسيبل الواجبة للمكبر الخاص بك

عند 1000 هيرتز.

3ـ7 كفاءة القدرة المتاحة لسماعة تعمل فى حاجز لا نهائى تساوى ٪، بفرض إشعاع إلى نصف – الفضاء. يوجد عند مسافة 20 قدم من السماعة ميكروفون ديناميكى. جهد الدائرة – المفتوحة لمعايرة الميكروفون يساوى $-90\,\text{db}\ re\ 1\ \text{volt}$ لمستوى ضغط صوت يساوى 1 ميكروبار. افترض أن السماعة تشع موجات كروية. افترض أيضا أن معاوقة الميكروفون تكون مقاوميه بشكل أساسى وتساوى 30 أوم. إذا كانت القدرة المتاحة للسماعة تساوى 10 واط، فما القدرة فى مقاومة 30 اوم متصلة مع الميكروفون؟

4ـ7 فى سماعة ما يوجد فقط فضاء محدود لملف صوت. فيما يلي بعض ثوابت وأبعاد هذه السماعة: قطر المخروط 0.25 م، كتلة المخروط 0.03كجم، قطر ملف الصوت 0.05م، أقصى سمك قطرى للفات ملف الصوت 0.0025 م، طول لفات ملف الصوت 0.0125م، وعدد لفات ملف الصوت 10.

(أ) احسب النسبة بين كفاءة السماعة لملف صوت الأمونيوم وكفاءة السماعة لملف صوت نحاس. افترض فقط المدى حيث $ka < 0.3$.

(ب) ما هى المقاومة المستمرة لكل ملف صوت؟

5ـ7 فى حالة التردد أسفل 500 هيرتز، عين تردد الرنين و Q_T الكلية لسماعة المشعاع – المباشر التى لها الثوابت الفيزيائية التالية، بفرض انها مثبتة فى حاجز لا نهائى. دع $R_g = 10\,\text{ohm}$ ، $R_E = 8\ \text{ohms}$ ، $B = 2.1\ \text{weber/m}^2$ ، $l = 10\ m$ ، $M_{MD} = 0.05\ \text{kg}$ ، $C_{MS} = 2\times10^{-4}\ \ \text{m/newton}$ ، و قطر فعال يساوى 0.2متر.

6ـ7 سماعة مشعاع – مباشر مثالية لها المميزات التالية:ـ كتلة المخروط وملف الصوت 0.025 كجم، مطاوعة التعليق يساوى $10^{-5}\ \text{m/newton}$ ، فيض فجوة الهواء يساوى 1 وبر/المتر المربع، و طول لفات ملف الصوت 10 متر. بفرض أن معاوقة ملف الصوت مهملة عند كل الترددات ذات الاهتمام وأن المعاوقة الصوتية النوعية لحمل الهواء على المخروط تساوى 407

نيوتن.ثانية/م^3.

(أ) عند أى تردد سوف يحدث رنين للسماعة.

(ب) إذا اخذت كتلة حمل الهواء فى الاعتبار، كيف سيتأثر تردد الرنين للنظام؟

(ج) ارسم تخطيط لاستجابة السماعة كدالة فى التردد. ناقش أى فروق بين هذا المنحنى ومنحنيات استجابة سماعة المشعاع – المباشر العادية.

7.7 بفرض سماعة مشعاع – مباشر ذات ملف واحد ومخروط واحد ولها المميزات التالية: قطر فعال يساوى 0.3 م، كتلة المخروط 0.025 كجم، كتلة ملف – الصوت 0.005 كجم، المطاوعة الميكانيكية للتعليق تساوى 6×10^{-5} m/newton، المقاومة الميكانيكية للتعليق تساوى 1.5 mks mechanical ohms ،فيض فجوة الهواء تساوى 1.0 ويبر/م^2، مقاومة ملف الصوت 8 أوم، الحث الذاتى لملف الصوت مهمل، قطر ملف الصوت 0.05 م، عدد لفات ملف الصوت 50، و مقاومة المولد 8 أوم. اوجد كفاءة القدرة المتاحة عند 500 هيرتز، باعتبار الإشعاع لجانب واحد من حاجز لانهائى.

8.7 بفرض سماعة مشعاع – مباشر ذات ملف واحد ومخروط واحد ولها المميزات التالية: قطر يساوى 8 بوصة، كتلة المخروط. 25جم، كتلة ملف – الصوت 2 جم، المطاوعة الميكانيكية للتعليق تساوى 5×10^{-7} cm/dyne، المقاومة الميكانيكية للتعليق تساوى 2000 mechanical ohms ،فيض فجوة الهواء تساوى 15000 جاوس، مقاومة ملف الصوت 8 أوم، الحث الذاتى لملف الصوت صغير ويهمل، قطر ملف الصوت 2.0 بوصة، عدد لفات ملف الصوت 50. بفرض ان جهد ثابت 1 فولت ج م م يظلل عبر أطراف ملف الصوت. احسب قدرة الخرج الصوتية عند 1000 هيرتز وعين الكفاءة عند هذا التردد، باعتبار أن الإشعاع يكون على جانب واحد من حاجز لانهائى.

الباب الثامن

1.8 صمم واعطى البيانات الموجزة لباء حاجز صندوق مغلق لسماعة لها قطر معلن 12 بوصة. يجب

أن يكون تردد الرنين للسماعة فى الصندوق المغلق 10٪ فقط اعلى من تردد الرنين بدون حاجز.

افترض أن مطاوعة التعليق، C_{MS}، تساوى 2.1×10^{-4} m/newton وكتلة الحجاب وملف الصوت ، M_{MD}، تساوى 0.012 كجم. ماذا سيكون تردد الرنين عندما تشع السماعة إلى الهواء على كلا جانبى حاجز لانهائى.

2ـ8 عند تثبيت السماعة الموصوفة فى المثال 3ـ8 فى الباب الثامن فى حاجز صندوق – مغلق له حجم 0.3 م^3 و $Q_T = 0.27$ فى حالة $R_g = 3$ ohms ، وتردد رنين 50 هيرتز.

(أ) ارسم منحنى الاستجابة عند الترددات تحت 400 هيرتز.

(ب) ما التأثير على استجابة السماعة الناتج من ثلاثة قباب (مخاريط لها ارتفاع 1سم وقطر 10 سم) مرفقة للمخروط لزيادة كتلة الحجاب. احسب الحالتين حيث تكون كتلة كل من القباب الثلاثة 0.02 و 0.1 كجم.

ملاحظة: فى الحسابات افترض أن $Q_T = M_A / R_A$ تكون كما هى عند كل التردد مثل قيمتها عند 100 هيرتز.

3ـ8 عند تثبيت السماعة الموصوفة فى المثال 3ـ8 فى حاجز صندوق – مغلق له حجم 0.3 م^3 و $Q_T = 0.27$ وتردد رنين 50 هيرتز عند فى حالة $R_g = 3$ ohms.

(أ) ارسم منحنى الاستجابة عند الترددات تحت 500 هيرتز.

(ب) ما التأثير على استجابة السماعة الناتج عن تثبيت قطاع قصير من بوق آسى فى مقدمة السماعة التى تحمل الجانب الأمامى لحجاب حاجز له المعاوقات الصوتية النوعية التالية (مقسومة على $\rho_o c$) فى مكان معاوقة إشعاع الجانب الأمامى؟

$X_S / \rho_o c$	$R_S / \rho_o c$	التردد، هيرتز
0.03	0.0005	20
0.05	0.002	40

0.1	0.008	75
0.2	0.03	150
0.4	0.1	250
0.5	0.15	300
0.6	0.25	400
0.7	0.4	500

4ـ8 وضعت سماعة 15 بوصة بمشعاع – مباشر تردد منخفض فى صندوق مغلق ويكون ضغط الصوت على محور (فى المجال البعيد) نسبة إلى ضغط حزمة – المنتصف كما هو مبين بالشكل 15ـ8، تحت الظروف التالية: $R_g = 14$ ohms ، $BL = 25$ webers/m ، $R_{MS} = 2.3$ mks mechanical ohms ، $M_{MD} = 0.045$kg ، حجم الصندوق يساوى 0.3 متر مكعب، $C_{MS} = 2.82$ m/newton ، $S_D / L^2 = 0.2$ (أنظر الشكل 6ـ8).

(أ) افترض اننا نرغب فى تحويل الصندوق المغلق إلى وعاء مفتح. ما تردد الرنين للدافع وهوائه يحمل) جزء التوالى من الدائرة فى الشكل 18ـ8(

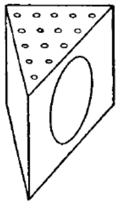
(ب) إذا قمنا ببناء المنفذ عن طريق قطع فتحة قطرها 20 سم فى الصندوق ووضعنا أنبوبة فيها، فما طول الأنبوبة المطلوب لجعل تردد الرنين عند التردد الموجود فى (أ)؟

(ج) ما التردد الجديد لرنين المخروط (بمعنى ω_L و ω_H لسرعة المخروط القصوى؟

(د) بالرجوع للأشكال 22ـ8 إلى 24ـ8، ارسم 3 نقاط وخطط إستجابات الضغط على محور فى الحالات Q_2 تساوى 0.5، 3.0، و 10.0. عند رسم المنحنى، خذ فى الاعتبار التغير فى الكفاءة فى المنطقة C، إذا وجد، منسوب الى التغير فى كفاءة الصندوق المغلق عند 500 هيرتز مع $R_g = 0$.

5ـ8 عند ترددات أسفل 500 هيرتز، حلل سلوك مجموعة انعكاس – الجهير المرسومة فى الشكل م 5ـ8، باعتبار المعلومات التالية: الحجم الداخلى للصندوق غير المشغول بالسماعة يساوى 0.5 قدم مكعب، عدد الفتحات يساوى 15 فتحة، قطر كل فتحة يساوى 0.5 بوصة، $R_g = 0$ ohms ، $R_E = 2$ ohms ، $M_{MD} = 0.0025$kg ، القطر المعلن يساوى 6 بوصة،

$BL = 5$ webers/m و $R_{MS} = 1.0$ mks mechanical ohms ، $C_{MS} = 3.6\times10^{-4}$ m/newton ،



الشكل م 5.8

6.8 عين طول فجوة الهواء الضرورية لبناء مغناطيس دائم لسماعة بمشعاع – مباشر لتوليد مستوى ضغط صوت غير مشوه مقداره 100 ديسيبل عند 20 قدم فى الفضاء الحر عند 40 هيرتز. افترض قطر معلن 12 بوصة، طول ملف الصوت 0.25 بوصة، وحاجز صندوق مغلق لانهائى. هل يكون من المعقول بناء سماعة بحجم فجوة الهواء هذا؟

الباب التاسع

1.9 مطلوب بناء بوق آسى له قطر الزور 1 بوصة، و أبعاد الفم 5×3 قدم.

(أ) عين أدنى تردد قطع يمكن استخدامه إذا كان طول البوق المسموح 6 قدم.

(ب) احسب ثابت التفجر لطول البوق لهذا التردد.

2.9 مطلوب بناء بوق آسى له تردد قطع $f_c = 70$ Hz . تتوفر وحدة دفع لها قطر 10 سم. صمم بوق بحيث يكون صغير كلما أمكن حتى يتفق مع الاستجابة المتولدة خلال ±3db بين 100 و 400 هيرتز. افترض أن المعاوقة الصوتية النوعية عند النظر للخلف إلى وحدة الدفع تكون $\rho_o c$ عند كل الترددات.

3.9 مطلوب تصميم نظام سماعة لإعادة توليد موسيقى. مطلوب فى السماعة أن يكون فيها قطاع للتردد المنخفض وقطاع للتردد العالى بوحدتى دفع منفصلتين. يجب ألا يزيد التشوه التوافقى لموجات الصوت المشع عن 5٪ عند أقصى قدره خرج صوتية المطلوبة 10 واط. إدنى تردد يجب أن يمر هو 90 هيرتز. يجب أن يكون تردد العبور 700 هيرتز ويمكنك أن تفترض أن القدرة تنقسم بالتساوى بين الوحدتين.

عين لكل بوق: (أ) أقطار الفوهات للأبواق، (ب) تردد القطع، (ج) مساحات الزور للأبواق، (د) ثوابت التفجر (التوهج)، (هـ) الأطوال، و (و) حد التردد العلوي لبوق التردد العلوي.

4.9 حلل البوق المبين فى الشكل 18.9 كمحاولة لتعلم: (أ) تردد قطعه، (ب) ثابت تفجره، و (ج) الترددات التى عندها يجب أن يولد البوق تأرجحات فى منحنى الاستجابة. افترض أن الارتفاع يساوى 18 بوصة، والعرض الكلى 30 بوصة والعمق الكلى 40 بوصة.

5.9 صمم أقصر طول ممكن لبوق يجب أن يوضع عند مقدمة سماعة مشعاع – مباشر لها حمل كتلة 0.1 كجم عند 40 هيرتز و حمل معاوقة صوتية نوعية $\rho_o c$ عند 400 هيرتز على حجاب له مساحة 0.12 متر مربع. ملحوظة: عند 40 هيرتز، يمكن معالجة البوق كأنبوبة أسطوانية تحتوي نفس الكتلة من الهواء.

6.9 استنتج كفاءة القدرة المتاحة عند عدة ترددات لسماعة لها قطر نموذجى 15 قدم إذا كانت السماعة تنتهي عند الطرف الأمامى بالبوق الموصوف فى المثال السابق والجانب الخلفى عند صندوق مغلق له مطاوعة تساوى مطاوعة هذا التعليق.

الباب العاشر

1.10 فى غرفة معينة مستطيلة يحدث نمط اهتزاز (1,0,0) عند 10 هيرتز، والنمط (0,2,0) يحدث عند 30 هيرتز، و النمط (0,0,3) عند 50 هيرتز، عندما تكون درجة حرارة $+20^o\text{C}$.

(أ) ما تردد النمط (2,3,1) عند $+20^o\text{C}$.

(ب) ماذا ستكون ترددات الأنماط (3,0,0) ، (0,2,0) ، و (0,0,1) عند -20^oC .

(ج) ارسم كنتورات تساوى الضغط للنمط (1,0,3) .

2.10 اوجد زوايا سقوط الموجات المنتقلة على الجدران الثلاثة لغرفة مستطيلة لها الأبعاد $1\times2\times3$ متر لأنماط الاهتزاز (10,17,3) ، و (3,17,10) .

3.10 ارسم منحنى الاستجابة وعين Q لنمط الاهتزاز الطبيعى لزمن ترداد 3 ثوانى و تردد رنين 1000

هيرتز.

4.10 عين ثابت الغرفة لغرفة معيشة فى منزلك أو لغرفة السكن الخاصة بك، باعتبار أن كل الأبواب والنوافذ مغلقة وأن شخصين يشغلان الغرفة.

5.10 مصدر صوت له تردد 1000 هيرتز ومستوى قدرة $100\ \text{db}\ re\ 10^{-13}\ \text{watt}$ موضوع فى مركز غرفة منتظمة كبيرة لها ثابت غرفة يساوى 1000 قدم مربع وأبعاد تقريبية $50\times40\times15$ قدم. إذا كان للمصدر دليل توجيهية يكون متماثل حول محور $\theta=0^o$ ويساوى $+10$ db عند $\theta=0^o$، ويساوى $+3$ db عند $\theta=45^o$، ويساوى -80 db عند $\theta=90^o$، ويساوى -30 db عند $\theta=135^o$، ويساوى -20 db عند $\theta=180^o$، ارسم منحنيات كنتور ج م م مستوى – ضغط – الصوت على مستوى أفقى موازى للأرضية ويقطع المصدر.

6.10 طلب منك معالجة صوتية لغرفة محاضرات صغيرة لها الأبعاد $11\times23\times40$ قدم. الجدران مطلية بجبس على لوح معدني، السقف مطلي بخرسانة، والأرضية مغطاة ببلاط مشمع أرضية. مساحة النوافذ 100 قدم مربع. صف المعالجة الصوتية المناسبة للغرفة، معتبرا أن 10 أفراد يجلسون على كراسى خشبية وزمن التراداد المطلوب هو 1.1 ثانية عند كل الترددات. هل امتصاص الهواء مهما عند 4000 هيرتز؟

7.10 غرفة محاضرات صغيرة لها الأبعاد $18\times30\times40$ قدم تحتوى على 50 طالب فى مقاعد خشبية. الجدران مطلية بجبس على قرميدة (بلاطة) مجوفة، والأرضية مطلية بالخرسانة. تكون ثلثى مساحة أحد الجدران (40×18 قدم) مشغولة بنوافذ، ومساحة السبورة 240 قدم مربع. زمن التراداد المرغوب هو 1.2 ثانية عند 500 هيرتز.

(أ) عين زمن التراداد للغرفة عند 500 هيرتز عندما تكون خالية، نصف مملوءة، ومملوءة بالكامل.

(ب) صف التصحيح الصوتى، معتبرا نصف – سعة المقاعد، واحسب زمن التراداد الجديد فى

حالة السعة الكاملة.

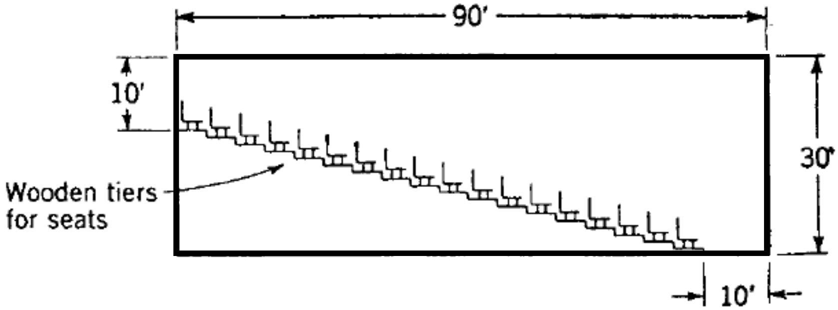
8ـ10 بفرض أن مميزة استجابة ضغط لسماعة مقاسة على المحور عند 10 قدم فى غرفة عديمة الصدى تكون كما يلى:

التردد، هيرتز	الاستجابة بالديسيبل مع مرجع 0.0002 ميكروبار وقدرة متاحة 1 فولت
100	98
200	100
400	102
1000	97
2000	100
4000	104

معامل التوجيهية Q يوجد من الشكل 24.4. إذا كانت هذه السماعة تستخدم فى حجرة حجمها 10000 قدم^3 ومساحتها 5000 قدم^2 وزمن ترداد مقداره 1.2 ثانية عند كل الترددات، احسب مستوى ضغط الصوت، عند الترددات الستة السابقة، التى ستولدها السماعة فى الغرفة عند 30 قدم لقدرة متاحة ثابتة مقدارها 1 مللى واط.

9ـ10 مطلوب معالجة قاعة محاضرات تستخدم فيها شبكة مكبرات صوت بمادة صوتية للحصول على أقصى صفات صوتية. الأبعاد والخصائص الأخرى للغرفة تكون كما يلي: الطول 90 قدم، العرض 100 قدم، الارتفاع 30 قدم عند الأمام و 10 قدم عند الخلف (انظر الشكل م 10ـ9.

ارضية القاعة مصنوعة من الخشب، الجدران والطلاء لكانت عبارة عن لصقة كلسية على لوح معدني. 350 مقعد كانت خشبية، وكان نصف السقف، ثلث الحوائط الجانبية وكل الحائط الخلفي مغطاة بنفس المادة الصوتية. بفرض أن زمن الترداد 1.4 ثانية عند كل الترددات لمستمع من 250 شخص، عين معاملات الترداد لمادة السقف كدالة فى التردد.



الشكل م10ـ9

10ـ10 مصدر صوتى له مستوى قدرة $110\text{db}\ re\ 10^{-12}$ watt موضوع فى غرفة غير منتظمة كبيرة لها ثابت غرفة يساوى 1000. إذا كان لأحد حوائط هذه الغرفة مساحة تساوى 600 قدم مربع وفقد انتقال مقداره 30 ديسيبل، اوجد مستوى ضغط الصوت بالقرب من الحائط وعبر الغرفة المجاورة، بفرض أن لها نفس ثابت الغرفة.

الباب الحادى عشر

1ـ11 منفاخ ذو طرد مركزى لفرن صهر لطرد تجمع الدخان يولد نغمة نقية عند تردد 100 هيرتز ومستوى قدرة 140 ديسيبل. يعترض الناس الذين يعيشون على مسافة 1000 قدم على الضوضاء، وإدارة الحى تتطلب من الشركة تخفيض المستوى إلى 25 $25\text{db}\ re\ 0.0002\text{microbar}$ ديسيبل عند كلّ الأحوال الجوية. أوصف المعالجة الصوتية المناسبة لهذا الوضع. افترض أن تجمع الدخان له قطر 6 أقدام وأن هذه المساحة المفتوحة يجب الإبقاء عليها فى المعالجة.

2ـ11 غرفة مؤتمرات هادئة لها الأبعاد $15\times30\times30$ قدم مطلوب بنائها خلف مركز تجارى له الأبعاد $24\times75\times200$ قدم. يجب ألا تزيد مستويات ضغط الصوت فى غرفة المؤتمرات عن 40 ديسيبل فى المتوسط فى كل الحزم 600ـ1200، 1200ـ2400، و 2400ـ4800 هيرتز. عند صياح 40 شخص فى المركز التجارى فى نفس الوقت، فما مقدار ونوع المعالجة الصوتية الواجب عملها فى كل من الغرفتين وما نوع الحائط الواجب إنشاءه بينهما لتوليد مستويات الصوت المرغوبة فى غرفة المؤتمرات؟

3.11 أربعة المكائن مرتبة لتعمل في فضاء على الأرضية 15×15 قدم في احد زوايا مكتب كبير 14×90×50 قدم. المطلوب هو ألا تزيد مستويات الضوضاء عن 55 ديسيبل فى الحزم 600ـ1200، 1200ـ2400، و 2400ـ4800 هيرتز فى الجزء غير المشغول من المكتب بواسطة المكائن المرتبة. اوصف المعالجة الصوتية اللازمة.

4.11 نظام تهوية فندقى يستخدم مروحة تولد مستويات القدرة الصوتية المدونة فى العمود الثانى أدناه.

حزمة التردد، هيرتز	مستويات القدرة $re\ 10^{-13}$ watt ، بالديسيبل	مستويات المعيار، بالديسيبل
37ـ75	90	50
75ـ150	90	40
150ـ300	89	30
300ـ600	85	25
600ـ1200	80	20

إذا كان من الواجب تخفيض القيم المبينة فى العمود الثالث، اوصف المعالجة الصوتية التى يجب أن تعطى تخفيض الضوضاء الضرورى فى أنبوب 6×6 قدم مع ترك حوالى 50٪ أو أكثر من مساحة الأنبوب مفتوحة على الهواء للتحرك خلالها.

5.11 غرفة فى بناية تواجه الشارع. مستوى الضوضاء عند مستوى النافذة سيكون 90 ديسيبل فى عدم وجود البناية. تصل الموجات عند الحائط بزوايا سقوط كثيرة. متوسط فقد الانتقال لزجاج النافذة يكون 29 ديسيبل، مساحة النوافذ 60 قدم مربع، وثابت الغرفة يكون 500 قدم مربع بدون معالجة و 3000 قدم مربع مع المعالجة. اوجد مستوى صوت التراداد فى الغرفة الواصل من ضوضاء المرور مع وبدون تصحيح الصوت فى الغرفة، بفرض أن كل الضوضاء تدخل خلال زجاج النوافذ.

6.11 فى غرفة مصنع صغيرة لها الأبعاد 20×50×30 قدم، يكون مستوى ضوضاء التراداد عند عمل جميع المكائن 94db re 0.0002 microbar. يكون زمن التراداد عندما يكون جميع المكائن ساكنة 2.8 ثانية.

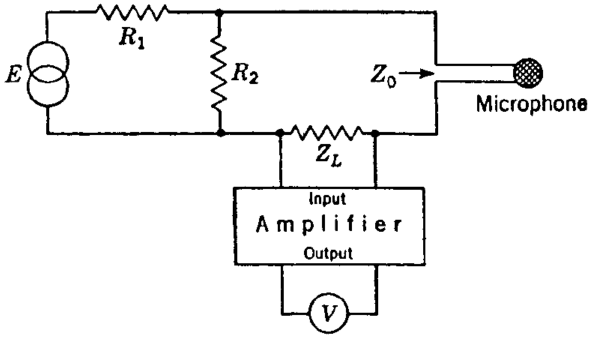
(أ) احسب الامتصاص الكلى بوحدات السابين الموجود فى الغرفة، معامل الامتصاص المتوسط، و ثابت الغرفة R.

(ب) احسب الامتصاص الكلى لمصدر ضوضاء وهمى يولد نفس مستوى ضوضاء الترداد مثل ضوضاء مكائن المصنع.

(ج) إذا كانت الجدران والسقف مغطاة بمادة تزيد معامل امتصاص هذه الأسطح إلى 0.7، أوجد زمن الترداد الناتج ومقدار التخفيض فى مجال الصوت المرتد.

الباب الثانى عشر

1ـ12 تم معايرة ميكروفون باستخدام الدائرة المبينة بالشكل م 12ـ1. تكون قيم الدائرة على النحو:- $R_1 = 999$ ohms ، $R_1 = 1.0$ ohms ، $Z_L = 50$ ohms resistive ، $Z_o = 50$ ohms resistive . فى البداية تم عمل دائرة ـ قصر للمولد E وغمر الميكروفون فى مجال الصوت. مع ضغط صوت مجال – حر مقداره 74db re 0.0002 microbar يقرأ الفولتميتر 10 فولت. حينئذ يتم إغلاق مجال الصوت. الآن يتم إزالة دائرة القصر عن المولد. عند ضبط E ليقرأ 2 فولت، فإن الفولتميتر V يقرأ 10 فولت مرة أخرى.



الشكل م 1ـ12

(أ) احسب جهد الدائرة – المفتوحة للميكروفون لضغط الصوت السابق.

(ب) تم توصيل الميكروفون إلى مبكر له كسب قدرة 90 ديسيبل وسماعة لها استجابة قدرة متاحة 74db re 0.0002 microbar و 1 واط مقاسة فى غرفة عديمة الصدى على بعد 30

قدم من المصدر. بفرض أن المعاوقات تكون متوافقة عند دخل المكبر، احسب مستوى ضغط الصوت المتولد عند نفس هذه المسافة مع مستوى ضغط صوت المجال – الحر قدره 70db *re* 0.0002 microbar عند الميكروفون.

2.12 بين أى من الجمل التالية تكون حقيقية وأيها تكون خاطئة.

(أ) ميكروفونات بلورة – ملح – روشيل لا تتأثر بدرجات الحرارة تحت 150^{o} C.

(ب) يجب أن تعمل ميكروفونات الملف – المتحرك مع مقاومات عالية جدا بدلا من مقاوماتها الأسمية وذلك لتفادى تخفيض الاستجابة الناتج عند الترددات العالية جدا.

(ج) يكون خرج الميكروفونات البلورية منخفضة عند الترددات العالية عنها عند الترددات المنخفضة عند استخدام 50 قدم من كابل محورى.

(د) تعطى مسجلات المستوى البيانى معلومات عن شكل الموجة الصوتية التى لها أساس 1000 هيرتز.

(هـ) يجب فحص مقاييس مستوى – الصوت بشكل دورى.

3.12 يستند مصدر صوتى على الأرض ويولد مستويات ضغط صوت 90، 85، 80، و 75 مع مرجع *re* 0.0002 microbar عند مراكز أربعة قطاعات فى سطح نصف كروى له نصف قطر 1 متر ويوجد المصدر فى مركزه. عين مستوى القدرة الكلية بفرض درجة الحرارة والضغط الجوى المعتاد. أيضا، اوجد دلائل التوجيهية الأربعة المصاحبة للمساحات الأربعة.

4.12 تم أخذ البيانات التالية بواسطة محلل نسبة مئوية ثابتة لضوضاء من مصدر طيف متصل. إذا كان للمصدر عرض حزمة تساوى 2٪ من التردد المتوسط، عين المستويات فى الحزم 8 – أوكتاف المعتادة.

التردد، هيرتز	مستوى الحزمة بالديسيبل، *re* 0.0002 microbar
30	33
50	36
100	44

55	200
52	500
50	1000
50	2000
50	5000
50	10000

5.12 طلب منك قياس طيف مستوى – القدرة لمحول قدرة 60 ديسيبل كبير فى الخلاء مجهز بمراوح تبريد كبيرة. الهدف من هذه الفحوصات هو تعيين تفاصيل طيف الضوضاء ومستويات حزم – الأوكتاف. افترض أنه يلزم كابل طوله 1000 قدم لإنجاز ذلك. افترض أيضا أنك ستصادف درجة حرارة حتى 100^{o} F، وأنه يجب قياس مستويات ضوضاء بين 40 و 80 ديسيبل.

ناقش كيف ستختار الجهاز المناسب، وكذلك كيف وأين ستأخذ البيانات، وكيف ستسجل البيانات وترسم منحنيات الناتج.

6.12 يجب معايرة زوج متماثل من ميكروفونات المكثف بواسطة تقنية التبادل. إذا كانت استجابة التردد – المنخفض للدائرة – المفتوحة لكل منهما 50 db re 1 volt – لمجال ضغط صوت مقداره 0.1 نيوتن/م^{2}. إذا كانت السعة الكهربية تساوى 50 ميكرو ميكروفاراد عندما يكون الميكروفون فى الفضاء الحر، وإذا كانت المطاوعة الصوتية لكل حجاب عندما تكون الأطراف الكهربية دائرة – مفتوحة تساوى 10^{-12} m^{5}/newton، وإذا كان حجم فضاء الهواء للاقتران (الربط) يساوى 10^{-5} m^{3}، اوجد النسبة بين جهد الدائرة – المفتوحة المتولد بالميكروفون رقم 2 إلى الجهد الذى يدفع الميكروفون رقم 1 عندما تنتهى أحجبة كل من الميكروفونان فى فضاء هواء الاقتران.

الباب الثالث عشر

1.13 عين مستوى الصخب بوحدات الفون لكل من الأصوات الثلاثة التالية، ومستوى الصخب الكلى للمجموعة: (أ) نغمة نقية ذات مستوى ضغط صوت (SPL) 70 ديسيبل عند 2000 هيرتز. (ب) حزمة من ضوضاء بيضاء لمستوى طيف يساوى 50 ديسيبل موضوعة بين 800 و

1000 هيرتز. (ج) نغمة نقية ذات مستوى ضغط صوت (SPL) 80 ديسيبل عند 40 هيرتز.

2.13 بين أى من العبارات التالية صحيح وأيها خاطئة.

(أ)إذا كنت تستمع إلى إشارة شفرة – مورس 1000 هيرتز فى وجود ضوضاء، فإن مرشح له عرض حزمة تساوى 100 هيرتز يتمركز عند 1000 هيرتز سوف يحسن مقدرتك على سمع الإشارات.

(ب) يكون صخب نغمة نقية لها مستوى ضغط صوت 60 ديسيبل عند 100 هيرتز تكون أقل من نصف صخب نغمة نقية لها مستوى ضغط صوت 60 ديسيبل عند 3000 هيرتز. افترض أن المقارنة تتم فى مجال- حر وأن دالة التحويل فى الشكل 11.13 هى مقياس الصخب.

(ج) ترتبط خطوات (تدريج) وإحداثي المكان للعصب السمعي بالتردد بنفس الأسلوب الذي ترتبط به البقع على غشاء قوقعة الأذن بالتردد تقريبا.

(د) بشكل عام تحجب نغمة التردد – المتوسط بواسطة نغمة التردد – المنخفض بشكل أقوى منه بواسطة نغمة التردد –العالى.

3.13 يمر مستوى طيف الضوضاء كدالة فى التردد بالنقاط التالية:

مستوى الحزمة بالديسيبل ، *re* 0.0002 microbar	التردد ، هيرتز
66	50
53	350
49	700
48	1000
51	1600
57	2200
55	3000
51	4000
49	5000
45	8000
43	12000

ارسم منحنى منعم على ورقة نصف لوغاريتمية يمر خلال هذه النقط لتحصل على منحنى

مستوى الضيف مقابل التردد.

احسب مستوى الصخابة فى حزم 300 مل حتى خطوة تساوى 3300 مل. أوجد مستوى الصخب الكلى.

4.13 بفرض سبع نغمات نقية لها الترددات ومستويات ضغط الصوت التالية:

التردد، هيرتز	مستوى الحزمة بالديسيبل، *re* 0.0002 microbar
40	85
100	80
300	78
700	82
1500	68
3500	75
9000	70

(أ) على ورقة نصف لوغاريتمية ارسم مستوى الصخابة مقابل التردد وذلك برسم خط رأسى عند تردد كل من النغمات السبعة.

(ب) افترض انه تم تخفيض ضغط الصوت لكل من هذه النغمات بمقدار 30 ديسيبل. ارسم مرة اخرى مستوى الصخابة مقابل التردد وعين مستوى الصخابة للمجموعة.

(ج) على ضوء التمرين السابق، هل يؤثر ضبط مفتاح تحكم الصوت فى الراديو على الوفاء بما يسمعه المستمع.

5.13 (أ) تم قياس ضوضاء فى سيارة متحركة بسرعة 40 ميل/الساعة بواسطة محلل له مرشح يتغير باستمرار كدالة فى التردد. يتغير عرض حزمة المرشح أيضا ويساوى $0.02f$. حول مستويات ضغط الصوت المقاسة، المعطاة أدناه، إلى مستويات طيف وارسم منحنى لها على ورقة نصف لوغاريتمية.

التردد، هيرتز	مستوى الحزمة بالديسيبل، *re* 0.0002 microbar
100	64
200	67
400	69

800	65
1200	61
2500	52
5000	49
10000	52

(ب) مجموعة مروحة تبريد، هزاز، ومحرك – مولد مطلوبة فى سيارة لغرض خاص. تصدر المروحة نغمة لها تردد 150 هيرتز، والهزاز يصدر نغمة 3000 هيرتز، ومحرك – المولد يصدر نغمة 670 هيرتز. كيف يجب قراءة مواصفات الضوضاء على كل من هذه الأدوات إذا كانت الأدوات الثلاثة يجب أن تكون غير مسموعة عندما تتحرك السيارة بسرعة أكبر من 40 ميل/الساعة. بفرض أن مستوى ضوضاء لكل من الأدوات الثلاث تجمع معا، فما هو مستوى الصخب الناتج عن النغمات الثلاثة مجتمعة معا عندما تكون السيارة ماتزال واقفة؟

الملحق الأول

جداول تحويل الديسيبل

(طبقا لشركة Courtesy of the General Radio
Company, Cambridge, Mass.)

في القياسات والحسابات في مجال الكهروصوتيات يكون من المناسب التعبير عن النسبة بين أى كميتين للقدرة الكهربية أو للقدرة الصوتية بوحدات تدريج لوغاريتمى. يكون الديسيبل ($\frac{1}{10}$ البل) على القاعدة (الأساس) – 10في الغالب مقياس في الاستعمال العالمى لهذا الغرض.

بما أن الجهد وضغط الصوت يرتبطان بالقدرة بواسطة المعاوقة، فإن الديسيبل يمكن أن يستخدم للتعبير عن نسب الجهد وضغط الصوت، إذا أخذت العناية في اعتبار المعاوقات الكهربائية المصاحبة بهم. تم إعداد الجداول 1 و 2 في الصفحات التالية لتسهيل جعل التحويلات في أى اتجاه بين عدد الديسيبلات ونسب القدرة، الجهد، و ضغط الصوت المقابل.

إيجاد قيم خارج مدى جداول التحويل

يمكن إيجاد القيم الموجودة خارج مدى الجدول 1 أو الجدول 2 المعروضة في الصفحات التالية بسهولة بمساعدة القواعد البسيطة التالية:-

الجدول 1: تحويل الديسيبلات إلى جهد، وضغط الصوت إلى نسب قدرة

1- عدد الديسيبلات موجب (+)

اطرح +20 ديسيبل بشكل متوالى من عدد الديسيبلات المعطى حتى يقع الباقى خلال مدى الجدول 1. لإيجاد نسبة الجهد (ضغط الصوت)، اضرب القيمة المقابلة على يمين عمود نسبة – الجهد في 10 لكل مرة طرحت فيها 20 ديسيبل. لإيجاد نسبة القدرة، اضرب القيمة المقابلة على يمين عمود نسبة – القدرة في 100 لكل مرة طرحت فيها 20 ديسيبل.

مثال – بفرض: 49.2 ديسيبل

$$49.2\ \text{db} - 20\ \text{db} - 20\ \text{db} = 9.2\ \text{db}$$

$$Voltage\,(sound\ \ pressure)\ ratio{:}9.2\ \text{db} \rightarrow$$

$$2.884 \times 10 \times 10 = 288.4$$

$$power\ ratio{:}9.2\ \text{db} \rightarrow$$

$$8.318 \times 100 \times 100 = 83{,}180$$

2ـ عدد الديسيبلات سالب (-)

أضف +20 ديسيبل بشكل متوالى لعدد الديسيبلات المعطى حتى يقع المجموع خلال مدى الجدول 1. بالنسبة للجهد (ضغط الصوت)، اقسم القيمة الموجودة على يسار عمود نسبة – الجهد على 10 لكل مرة أضفت فيها 20 ديسيبل. بالنسبة لنسبة القدرة، اقسم القيمة المقابلة على يسار عمود نسبة – القدرة على 100 لكل مرة أضفت فيها 20 ديسيبل.

مثال – بفرض: -49.2 db

$$-49.2\ \text{db} + 20\ \text{db} + 20\ \text{db} = -9.2\ \text{db}$$

$$Voltage\,(sound\ \ pressure)\ ratio{:}-9.2\ \text{db} \rightarrow$$

$$0.3467 \times \frac{1}{10} \times \frac{1}{10} = 0.003467$$

$$power\ ratio{:}-9.2\ \text{db} \rightarrow$$

$$0.1202 \times \frac{1}{100} \times \frac{1}{100} = 0.00001202$$

الجدول 2: تحويل نسب الجهد وضغط الصوت إلى ديسيبلات

في حالة النسب الأصغر من تلك الموجودة في الجدول أضرب النسبة المعطاة على التوالى في 10 حتى تجد حاصل الضرب في الجدول. من عدد الديسيبلات الموجود، اطرح +20 ديسيبل كل مرة قمت فيها بالضرب في 10.

مثال

بفرض أن نسبة الجهد (ضغط الصوت) تساوى 0.0131

$$0.0131\times10\times10=1.31$$

From Table II, 1.31 db $\rightarrow$

$$2.345\text{ db} - 20\text{ db} - 20\text{db} = -37.655\text{db}$$

في حالة النسب الأكبر من تلك الموجودة في الجدول أقسم النسبة المعطاة على التوالى على 10 حتى تجد باقى القسمة في الجدول. من عدد الديسيبلات الموجود، أضف +20 ديسيبل كل مرة قمت فيها بالقسمة على 10.

مثال

بفرض أن نسبة الجهد (ضغط الصوت) تساوى 712

$$712\times\frac{1}{10}\times\frac{1}{10}=7.12$$

From Table II, 7.12 $\rightarrow$

$$17.050\text{ db} + 20\text{ db} + 20\text{db} = 57.050\text{ db}$$

الجدول 1 تحويل الديسيبلات إلى نسب جهد، ضغط الصوت والقدرة. بالنسبة للإشارات، في حالة قيم الديسيبل الموجبة (+) تكون كل من نسب الجهد والقدرة أكبر من الوحدة. في هذه الحالة، استخدم العمودين الموجودين على اليمين. في حالة قيم الديسيبل السالبة (-) تكون كل من نسب الجهد والقدرة أقل من الوحدة. في هذه الحالة، استخدم العمودين الموجودين على اليسار. استخدم أعمدة الجهد في حالة ضغوط الصوت

مثال: بفرض ± 9.1 db. أوجد

	Power ratio	Voltage ratio
+9.1 db	8.128	2.851
−9.1 db	0.1230	0.3508

−		db	+		−		db	+	
Voltage ratio	Power ratio		Voltage ratio	Power ratio	Voltage ratio	Power ratio		Voltage ratio	Power ratio
0.5012	0.2512	6.0	1.995	3.981	0.3350	0.1122	9.5	2.985	8.913
0.4955	0.2455	6.1	2.018	4.074	0.3311	0.1096	9.6	3.020	9.120
0.4898	0.2399	6.2	2.042	4.169	0.3273	0.1072	9.7	3.055	9.333
0.4842	0.2344	6.3	2.065	4.266	0.3236	0.1047	9.8	3.090	9.550
0.4786	0.2291	6.4	2.089	4.365	0.3199	0.1023	9.9	3.126	9.772
0.4732	0.2239	6.5	2.113	4.467	0.3162	0.1000	10.0	3.162	10.000
0.4677	0.2188	6.6	2.138	4.571	0.3126	0.09772	10.1	3.199	10.23
0.4624	0.2138	6.7	2.163	4.677	0.3090	0.09550	10.2	3.236	10.47
0.4571	0.2089	6.8	2.188	4.786	0.3055	0.09333	10.3	3.273	10.72
0.4519	0.2042	6.9	2.213	4.898	0.3020	0.09120	10.4	3.311	10.96
0.4467	0.1995	7.0	2.239	5.012	0.2985	0.08913	10.5	3.350	11.22
0.4416	0.1950	7.1	2.265	5.129	0.2951	0.08710	10.6	3.388	11.48
0.4365	0.1905	7.2	2.291	5.248	0.2917	0.08511	10.7	3.428	11.75
0.4315	0.1862	7.3	2.317	5.370	0.2884	0.08318	10.8	3.467	12.02
0.4266	0.1820	7.4	2.344	5.495	0.2851	0.08128	10.9	3.508	12.30
0.4217	0.1778	7.5	2.371	5.623	0.2818	0.07943	11.0	3.548	12.59
0.4169	0.1738	7.6	2.399	5.754	0.2786	0.07762	11.1	3.589	12.88
0.4121	0.1698	7.7	2.427	5.888	0.2754	0.07586	11.2	3.631	13.18
0.4074	0.1660	7.8	2.455	6.026	0.2723	0.07413	11.3	3.673	13.49
0.4027	0.1622	7.9	2.483	6.166	0.2692	0.07244	11.4	3.715	13.80
0.3981	0.1585	8.0	2.512	6.310	0.2661	0.07079	11.5	3.758	14.13
0.3936	0.1549	8.1	2.541	6.457	0.2630	0.06918	11.6	3.802	14.45
0.3890	0.1514	8.2	2.570	6.607	0.2600	0.06761	11.7	3.846	14.79
0.3846	0.1479	8.3	2.600	6.761	0.2570	0.06607	11.8	3.890	15.14
0.3802	0.1445	8.4	2.630	6.918	0.2541	0.06457	11.9	3.936	15.49
0.3758	0.1413	8.5	2.661	7.079	0.2512	0.06310	12.0	3.981	15.85
0.3715	0.1380	8.6	2.692	7.244	0.2483	0.06166	12.1	4.027	16.22
0.3673	0.1349	8.7	2.723	7.413	0.2455	0.06026	12.2	4.074	16.60
0.3631	0.1318	8.8	2.754	7.586	0.2427	0.05888	12.3	4.121	16.98
0.3589	0.1288	8.9	2.786	7.762	0.2399	0.05754	12.4	4.169	17.38
0.3548	0.1259	9.0	2.818	7.943	0.2371	0.05623	12.5	4.217	17.78
0.3508	0.1230	9.1	2.851	8.128	0.2344	0.05495	12.6	4.266	18.20
0.3467	0.1202	9.2	2.884	8.318	0.2317	0.05370	12.7	4.315	18.62
0.3428	0.1175	9.3	2.917	8.511	0.2291	0.05248	12.8	4.365	19.05
0.3388	0.1148	9.4	2.951	8.710	0.2265	0.05129	12.9	4.416	19.50

تابع الجدول 1

−		db	+		−		db	+	
Voltage ratio	Power ratio		Voltage ratio	Power ratio	Voltage ratio	Power ratio		Voltage ratio	Power ratio
0.2239	0.05012	13.0	4.467	19.95	0.1496	0.02239	16.5	6.683	44.67
0.2213	0.04898	13.1	4.519	20.42	0.1479	0.02188	16.6	6.761	45.71
0.2188	0.04786	13.2	4.571	20.89	0.1462	0.02138	16.7	6.839	46.77
0.2163	0.04677	13.3	4.624	21.38	0.1445	0.02089	16.8	6.918	47.86
0.2138	0.04571	13.4	4.677	21.88	0.1429	0.02042	16.9	6.998	48.98
0.2113	0.04467	13.5	4.732	22.39	0.1413	0.01995	17.0	7.079	50.12
0.2089	0.04365	13.6	4.786	22.91	0.1396	0.01950	17.1	7.161	51.29
0.2065	0.04266	13.7	4.842	23.44	0.1380	0.01905	17.2	7.244	52.48
0.0242	0.04169	13.8	4.898	23.99	0.1365	0.01862	17.3	7.328	53.70
0.2018	0.04074	13.9	4.955	24.55	0.1349	0.01820	17.4	7.413	54.95
0.1995	0.03981	14.0	5.012	25.12	0.1334	0.01778	17.5	7.499	56.23
0.1972	0.03890	14.1	5.070	25.70	0.1318	0.01738	17.6	7.586	57.54
0.1950	0.03802	14.2	5.129	26.30	0.1303	0.01698	17.7	7.674	58.88
0.1928	0.03715	14.3	5.188	26.92	0.1288	0.01660	17.8	7.762	60.26
0.1905	0.03631	14.4	5.248	27.54	0.1274	0.01622	17.9	7.852	61.66
0.1884	0.03548	14.5	5.309	28.18	0.1259	0.01585	18.0	7.943	63.10
0.1862	0.03467	14.6	5.370	28.84	0.1245	0.01549	18.1	8.035	64.57
0.1841	0.03388	14.7	5.433	29.51	0.1230	0.01514	18.2	8.128	66.07
0.1820	0.03311	14.8	5.495	30.20	0.1216	0.01479	18.3	8.222	67.61
0.1799	0.03236	14.9	5.559	30.90	0.1202	0.01445	18.4	8.318	69.18
0.1778	0.03162	15.0	5.623	31.62	0.1189	0.01413	18.5	8.414	70.79
0.1758	0.03090	15.1	5.689	32.36	0.1175	0.01380	18.6	8.511	72.44
0.1738	0.03020	15.2	5.754	33.11	0.1161	0.01349	18.7	8.610	74.13
0.1718	0.02951	15.3	5.821	33.88	0.1148	0.01318	18.8	8.710	75.86
0.1698	0.02884	15.4	5.888	34.67	0.1135	0.01288	18.9	8.811	77.62
0.1679	0.02818	15.5	5.957	35.48	0.1122	0.01259	19.0	8.913	79.43
0.1660	0.02754	15.6	6.026	36.31	0.1109	0.01230	19.1	9.016	81.28
0.1641	0.02692	15.7	6.095	37.15	0.1096	0.01202	19.2	9.120	83.18
0.1622	0.02630	15.8	6.166	38.02	0.1084	0.01175	19.3	9.226	85.11
0.1603	0.02570	15.9	6.237	38.90	0.1072	0.01148	19.4	9.333	87.10
0.1585	0.02512	16.0	6.310	39.81	0.1059	0.01122	19.5	9.441	89.13
0.1567	0.02455	16.1	6.383	40.74	0.1047	0.01096	19.6	9.550	91.20
0.1549	0.02399	16.2	6.457	41.69	0.1035	0.01072	19.7	9.661	93.33
0.1531	0.02344	16.3	6.531	42.66	0.1023	0.01047	19.8	9.772	95.50
0.1514	0.02291	16.4	6.607	43.65	0.1012	0.01023	19.9	9.886	97.72
					0.1000	0.01000	20.0	10.000	100.00

تابع الجدول 1

−		db	+	
Voltage ratio	Power ratio		Voltage ratio	Power ratio
3.162×10^{-1}	10^{-1}	10	3.162	10
10^{-1}	10^{-2}	20	10	10^{2}
3.162×10^{-2}	10^{-3}	30	3.162×10	10^{3}
10^{-2}	10^{-4}	40	10^{2}	10^{4}
3.162×10^{-3}	10^{-5}	50	3.162×10^{2}	10^{5}
10^{-3}	10^{-6}	60	10^{3}	10^{6}
3.162×10^{-4}	10^{-7}	70	3.162×10^{3}	10^{7}
10^{-4}	10^{-8}	80	10^{4}	10^{8}
3.162×10^{-5}	10^{-9}	90	3.162×10^{4}	10^{9}
10^{-5}	10^{-10}	100	10^{5}	10^{10}

الجدول 2 تحويلات نسب الجهد وضغط الصوت إلى ديسيبلات

في حالة نسب الجهد وضغط الصوت استخدم الجدول مباشرة. في حالة نسب القدرة، لإيجاد عدد الديسيبلات المقابلة لنسبة القدرة المعطاة، افترض أن نسبة القدرة المعطاة كأنها نسبة جهد ثم أوج عدد الديسيبلات المقابل في الجدول. تكون النتيجة الدقيقة هى نصف عدد الديسيبلات الموجود.

مثال: بفرض أن نسبة القدرة 3.41 أوجد 3.41 في الجدول:

$$3.41 \rightarrow 10.655 \text{ db} \times 1/2 = 5.328 \text{ db}$$

Voltage ratio	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
1.0	0.000	0.086	0.172	0.257	0.341	0.424	0.506	0.588	0.668	0.749
1.1	0.828	0.906	0.984	1.062	1.138	1.214	1.289	1.364	1.438	1.511
1.2	1.584	1.656	1.727	1.798	1.868	1.938	2.007	2.076	2.144	2.212
1.3	2.279	2.345	2.411	2.477	2.542	2.607	2.671	2.734	2.798	2.860
1.4	2.923	2.984	3.046	3.107	3.167	3.227	3.287	3.346	3.405	3.464
1.5	3.522	3.580	3.637	3.694	3.750	3.807	3.862	3.918	3.973	4.028
1.6	4.082	4.137	4.190	4.244	4.297	4.350	4.402	4.454	4.506	4.558
1.7	4.609	4.660	4.711	4.761	4.811	4.861	4.910	4.959	5.008	5.057
1.8	5.105	5.154	5.201	5.249	5.296	5.343	5.390	5.437	5.483	5.529
1.9	5.575	5.621	5.666	5.711	5.756	5.801	5.845	5.889	5.933	5.977
2.0	6.021	6.064	6.107	6.150	6.193	6.235	6.277	6.319	6.361	6.403
2.1	6.444	6.486	6.527	6.568	6.608	6.649	6.689	6.729	6.769	6.809
2.2	6.848	6.888	6.927	6.966	7.008	7.044	7.082	7.121	7.159	7.197
2.3	7.235	7.272	7.310	7.347	7.384	7.421	7.458	7.495	7.532	7.568
2.4	7.604	7.640	7.676	7.712	7.748	7.783	7.819	7.854	7.889	7.924
2.5	7.959	7.993	8.028	8.062	8.097	8.131	8.165	8.199	8.232	8.266
2.6	8.299	8.333	8.366	8.399	8.432	8.465	8.498	8.530	8.563	8.595
2.7	8.627	8.659	8.691	8.723	8.755	8.787	8.818	8.850	8.881	8.912
2.8	8.943	8.974	9.005	9.036	9.066	9.097	9.127	9.158	9.188	9.218
2.9	9.248	9.278	9.308	9.337	9.367	9.396	9.426	9.455	9.484	9.513
3.0	9.542	9.571	9.600	9.629	9.657	9.686	9.714	9.743	9.771	9.799
3.1	9.827	9.855	9.883	9.911	9.939	9.966	9.994	10.021	10.049	10.076
3.2	10.103	10.130	10.157	10.184	10.211	10.238	10.264	10.291	10.317	10.344
3.3	10.370	10.397	10.423	10.449	10.475	10.501	10.527	10.553	10.578	10.604
3.4	10.630	10.655	10.681	10.706	10.731	10.756	10.782	10.807	10.832	10.857
3.5	10.881	10.906	10.931	10.955	10.980	11.005	11.029	11.053	11.078	11.102
3.6	11.126	11.150	11.174	11.198	11.222	11.246	11.270	11.293	11.317	11.341
3.7	11.364	11.387	11.411	11.434	11.457	11.481	11.504	11.527	11.550	11.573
3.8	11.596	11.618	11.641	11.664	11.687	11.709	11.732	11.754	11.777	11.799
3.9	11.821	11.844	11.866	11.888	11.910	11.932	11.954	11.976	11.998	12.019
4.0	12.041	12.063	12.085	12.106	12.128	12.149	12.171	12.192	12.213	12.234
4.1	12.256	12.277	12.298	12.319	12.340	12.361	12.382	12.403	12.424	12.444
4.2	12.465	12.486	12.506	12.527	12.547	12.568	12.588	12.609	12.629	12.649
4.3	12.669	12.690	12.710	12.730	12.750	12.770	12.790	12.810	12.829	12.849
4.4	12.869	12.889	12.908	12.928	12.948	12.967	12.987	13.006	13.026	13.045

تابع الجدول 2

'oltage ratio	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
4.5	13.064	13.084	13.103	13.122	13.141	13.160	13.179	13.198	13.217	13.236
4.6	13.255	13.274	13.293	13.312	13.330	13.349	13.368	13.386	13.405	13.423
4.7	13.442	13.460	13.479	13.497	13.516	13.534	13.552	13.570	13.589	13.607
4.8	13.625	13.643	13.661	13.679	13.697	13.715	13.733	13.751	13.768	13.786
4.9	13.804	13.822	13.839	13.857	13.875	13.892	13.910	13.927	13.945	13.962
5.0	13.979	13.997	14.014	14.031	14.049	14.066	14.083	14.100	14.117	14.134
5.1	14.151	14.168	14.185	14.202	14.219	14.236	14.253	14.270	14.287	14.303
5.2	14.320	14.337	14.353	14.370	14.387	14.403	14.420	14.436	14.453	14.469
5.3	14.486	14.502	14.518	14.535	14.551	14.567	14.538	14.599	14.616	14.632
5.4	14.648	14.664	14.680	14.696	14.712	14.728	14.744	14.760	14.776	14.791
5.5	14.807	14.823	14.839	14.855	14.870	14.886	14.902	14.917	14.933	14.948
5.6	14.964	14.979	14.995	15.010	15.026	15.041	15.056	15.072	15.087	15.102
5.7	15.117	15.133	15.148	15.163	15.178	15.193	15.208	15.224	15.239	15.254
5.8	15.269	15.284	15.298	15.313	15.328	15.343	15.358	15.373	15.388	15.402
5.9	15.417	15.432	15.446	15.461	15.476	15.490	15.505	15.519	15.534	15.549
6.0	15.563	15.577	15.592	15.606	15.621	15.635	15.649	15.664	15.678	15.692
6.1	15.707	15.721	15.735	15.749	15.763	15.778	15.792	15.806	15.820	15.834
6.2	15.848	15.862	15.876	15.890	15.904	15.918	15.931	15.945	15.959	15.973
6.3	15.987	16.001	16.014	16.028	16.042	16.055	16.069	16.083	16.096	16.110
6.4	16.124	16.137	16.151	16.164	16.178	16.191	16.205	16.218	16.232	16.245
6.5	16.258	16.272	16.285	16.298	16.312	16.325	16.338	16.351	16.365	16.378
6.6	16.391	16.404	16.417	16.430	16.443	16.456	16.469	16.483	16.496	16.509
6.7	16.521	16.534	16.547	16.560	16.573	16.586	16.599	16.612	16.625	16.637
6.8	16.650	16.663	16.676	16.688	16.701	16.714	16.726	16.739	16.752	16.764
6.9	16.777	16.790	16.802	16.815	16.827	16.840	16.852	16.865	16.877	16.890
7.0	16.902	16.914	16.927	16.939	16.951	16.964	16.976	16.988	17.001	17.013
7.1	17.025	17.037	17.050	17.062	17.074	17.086	17.098	17.110	17.122	17.135
7.2	17.147	17.159	17.171	17.183	17.195	17.207	17.219	17.231	17.243	17.255
7.3	17.266	17.278	17.290	17.302	17.314	17.326	17.338	17.349	17.361	17.373
7.4	17.385	17.396	17.408	17.420	17.431	17.443	17.455	17.466	17.748	17.490
7.5	17.501	17.513	17.524	17.536	17.547	17.559	17.570	17.582	17.593	17.605
7.6	17.616	17.628	17.639	17.650	17.662	17.673	17.685	17.696	17.707	17.719
7.7	17.730	17.741	17.752	17.764	17.775	17.786	17.797	17.808	17.820	17.831
7.8	17.842	17.853	17.864	17.875	17.886	17.897	17.908	17.919	17.931	17.942
7.9	17.953	17.964	17.975	17.985	17.996	18.007	18.018	18.020	18.040	18.051
8.0	18.062	18.073	18.083	18.094	18.105	18.116	18.127	18.137	18.148	18.159
8.1	18.170	18.180	18.191	18.202	18.212	18.223	18.234	18.244	18.255	18.266
8.2	18.276	18.287	18.297	18.308	18.319	18.329	18.340	18.350	18.361	18.371
8.3	18.382	18.392	18.402	18.413	18.423	18.434	18.444	18.455	18.465	18.475
8.4	18.486	18.486	18.506	18.517	18.527	18.537	18.547	18.558	18.568	18.578

تابع الجدول 2

Voltage ratio	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
8.5	18.588	18.599	18.609	18.619	18.629	18.639	18.649	18.660	18.670	18.680
8.6	18.690	18.700	18.710	18.720	18.730	18.740	18.750	18.760	18.770	18.780
8.7	18.790	18.800	18.810	18.820	18.830	18.840	18.850	18.860	18.870	18.880
8.8	18.890	18.900	18.909	18.919	18.929	18.939	18.949	18.958	18.968	18.978
8.9	18.988	18.998	19.007	19.017	19.027	19.036	19.046	19.056	19.066	19.075
9.0	19.085	19.094	19.104	19.114	19.123	19.133	19.143	19.152	19.162	19.171
9.1	19.181	19.190	19.200	19.209	19.219	19.228	19.238	19.247	19.257	19.266
9.2	19.276	19.285	19.295	19.304	19.313	19.323	19.332	19.342	19.351	19.360
9.3	19.370	19.379	19.388	19.398	19.407	19.416	19.426	19.435	19.444	19.453
9.4	19.463	19.472	19.481	19.490	19.499	19.509	19.518	19.527	19.536	19.545
9.5	19.554	19.564	19.573	19.582	19.591	19.600	19.609	19.618	19.627	19.636
9.6	19.645	19.654	19.664	19.673	19.682	19.691	19.700	19.709	19.718	19.726
9.7	19.735	19.744	19.753	19.762	19.771	19.780	19.789	19.798	19.807	19.816
9.8	19.825	19.833	19.842	19.851	19.860	19.869	19.878	19.886	19.895	19.904
9.9	19.913	19.921	19.930	19.939	19.948	19.956	19.965	19.974	19.983	19.991

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	20.000	20.828	21.584	22.279	22.923	23.522	24.082	24.609	25.105	25.575
20	26.021	26.444	26.848	27.235	27.604	27.959	28.299	28.627	28.943	29.248
30	29.542	29.827	30.103	30.370	30.630	30.881	31.126	31.364	31.596	31.821
40	32.041	32.256	32.465	32.669	32.869	33.064	33.255	33.442	33.625	33.804
50	33.979	34.151	34.320	34.486	34.648	34.807	34.964	35.117	35.269	35.417
60	35.563	35.707	35.848	35.987	36.124	36.258	36.391	36.521	36.650	36.777
70	36.902	37.025	37.147	37.266	37.385	37.501	37.616	37.730	37.842	37.953
80	38.062	38.170	38.276	28.382	38.486	38.588	38.690	38.790	38.890	38.988
90	39.085	39.181	39.276	39.370	39.463	39.554	39.645	39.735	39.825	39.913
100	40.000									

الملحق الثاني
معاملات التحويل

تم استخدام القيم التالية للثوابت الأساسية في تحضير المعاملات.

1 m	=	39.37 in. = 3.281 ft
1 lb (weight)	=	0.4536 kg = 0.03108 slug
1 slug	=	14.594 kg
1 lb (force)	=	4.448 newtons
Acceleration due to gravity	=	$9.807\ m/sec^2$
	=	$32.174\ ft/sec^2$
Density of H_2O at 4°C	=	$10^3\ kg/m^3$
Density of Hg at 0°C	=	$1.3595 \times 10^4\ kg/m^3$
1 U.S. lb	=	1 British lb
1 U.S. gallon	=	0.83267 British gallon

الجدول 3

التحويل من	التحويل إلى	إضرب فى	أقسم على
acres	ft^2	4.356×10^4	2.296×10^{-5}
	$miles^2$ (statute)	1.562×10^{-3}	640
	m^2	4,047	2.471×10^{-4}
	hectare ($10^4\ m^2$)	0.4047	2.471
atm	in. H_2O at 4°C	406.80	2.458×10^{-3}
	in. Hg at 0°C	29.92	3.342×10^{-2}
	ft H_2O at 4°C	33.90	2.950×10^{-2}
	mm Hg at 0°C	760	1.316×10^{-3}
	lb/in.^{2}	14.70	6.805×10^{-2}
	newtons/m^2	1.0132×10^5	9.872×10^{-6}
	kg/m^2	1.033×10^4	9.681×10^{-5}
°C	°F	(°C × 9/5) + 32	(°F − 32) × 5/9
cm	in.	0.3937	2.540
	ft	3.281×10^{-2}	30.48
	m	10^{-2}	10^2
circular mils	in.^{2}	7.85×10^{-7}	1.274×10^6
	cm^2	5.067×10^{-6}	1.974×10^5
cm^2	in.^{2}	0.1550	6.452
	ft^2	1.0764×10^{-3}	929
	m^2	10^{-4}	10^4
cm^3	in.^{3}	0.06102	16.387
	ft^3	3.531×10^{-5}	2.832×10^4
	m^3	10^{-6}	10^6
deg (angle)	radians	1.745×10^{-2}	57.30
dynes	lb (force)	2.248×10^{-6}	4.448×10^5
	newtons	10^{-5}	10^5
dynes/cm^2	lb/ft^2 (force)	2.090×10^{-3}	478.5
	newtons/m^2	10^{-1}	10
ergs	ft-lb (force)	7.376×10^{-8}	1.356×10^7
	joules	10^{-7}	10^7
ergs/cm^3	ft-lb/ft^3	2.089×10^{-3}	478.7
ergs/sec	watts	10^{-7}	10^7
	ft-lb/sec	7.376×10^{-8}	1.356×10^7
ergs/sec-cm^2	ft-lb/sec-ft^2	6.847×10^{-5}	1.4605×10^4
fathoms	ft	6	0.16667
ft	in.	12	0.08333
	cm	30.48	3.281×10^{-2}
	m	0.3048	3.281
ft^2	in.^{2}	144	6.945×10^{-3}
	cm^2	9.290×10^2	0.010764
	m^2	9.290×10^{-2}	10.764
ft^3	in.^{3}	1728	5.787×10^{-4}
	cm^3	2.832×10^4	3.531×10^{-5}
	m^3	2.832×10^{-2}	35.31
	liters	28.32	3.531×10^{-2}

تابع الجدول 3

التحويل من	التحويل إلى	إضرب فى	أقسم على
ft H_2O at 4°C	in. Hg at 0°C	0.8826	1.133
	lb/in.^{2}	0.4335	2.307
	lb/ft^2	62.43	1.602×10^{-2}
	newtons/m^2	2989	3.345×10^{-4}
gal (liquid U.S.)	gal (liquid Brit. Imp.)	0.8327	1.2010
	liters	3.785	0.2642
	m^3	3.785×10^{-3}	264.2
gm	oz (weight)	3.527×10^{-2}	28.35
	lb (weight)	2.205×10^{-3}	453.6
hp (550 ft-lb/sec)	ft-lb/min	3.3×10^4	3.030×10^{-5}
	watts	745.7	1.341×10^{-3}
	kw	0.7457	1.341
in.	ft	0.0833	12
	cm	2.540	0.3937
	m	0.0254	39.37
in.^{2}	ft^2	0.006945	144
	cm^2	6.452	0.1550
	m^2	6.452×10^{-4}	1550
in.^{3}	ft^3	5.787×10^{-4}	1.728×10^3
	cm^3	16.387	6.102×10^{-2}
	m^3	1.639×10^{-5}	6.102×10^4
kg	lb (weight)	2.2046	0.4536
	slug	0.06852	14.594
	gm	10^3	10^{-3}
kg/m^2	lb/in.^{2} (weight)	0.001422	703.0
	lb/ft^2 (weight)	0.2048	4.882
	gm/cm^2	10^{-1}	10
kg/m^3	lb/in.^{3} (weight)	3.613×10^{-6}	2.768×10^4
	lb/ft^3 (weight)	6.243×10^{-2}	16.02
liters	in.^{3}	61.03	1.639×10^{-2}
	ft^3	0.03532	28.32
	pints (liquid U.S.)	2.1134	0.47318
	quarts (liquid U.S.)	1.0567	0.94636
	gal (liquid U.S.)	0.2642	3.785
	cm^3	1000	0.001
	m^3	0.001	1000
$\log_e n$, or $\ln n$	$\log_{10} n$	0.4343	2.303
m	in.	39.371	0.02540
	ft	3.2808	0.30481
	yd	1.0936	0.9144
	cm	10^2	10^{-2}
m^2	in.^{2}	1550	6.452×10^{-4}
	ft^2	10.764	9.290×10^{-2}
	yd^2	1.196	0.8362
	cm^2	10^4	10^{-4}
m^3	in.^{3}	6.102×10^4	1.639×10^{-5}
	ft^3	35.31	2.832×10^{-2}

تابع الجدول 3

التحويل من	التحويل إلى	إضرب فى	أقسم على
m^3 *(Cont.)*	yd^3	1.3080	0.7646
	cm^3	10^6	10^{-6}
microbars ($dynes/cm^2$)	$lb/in.^2$	1.4513×10^{-5}	6.890×10^4
	lb/ft^2	2.090×10^{-3}	478.5
	$newtons/m^2$	10^{-1}	10
miles (nautical)	ft	6080	1.645×10^{-4}
	km	1.852	0.5400
miles (statute)	ft	5280	1.894×01^{-4}
	km	1.6093	0.6214
$miles^2$ (statute)	ft^2	2.788×10^7	3.587×10^{-8}
	km^2	2.590	0.3861
	acres	640	1.5625×10^{-3}
mph	ft/min	88	1.136×10^{-2}
	km/min	2.682×10^{-2}	37.28
	km/hr	1.6093	0.6214
nepers	db	8.686	0.1151
newtons	lb (force)	0.2248	4.448
	dynes	10^5	10^{-5}
$newtons/m^2$	$lb/in.^2$ (force)	1.4513×10^{-4}	6.890×10^3
	lb/ft^2 (force)	2.090×10^{-2}	47.85
	$dynes/cm^2$	10	10^{-1}
lb (force)	newtons	4.448	0.2248
lb (weight)	slugs	0.03108	32.17
	kg	0.4536	2.2046
lb H_2O (distilled)	ft^3	1.602×10^{-2}	62.43
	gal (liquid U.S.)	0.1198	8.346
$lb/in.^2$ (weight)	lb/ft^2 (weight)	144	6.945×10^{-3}
	kg/m^2	703	1.422×10^{-3}
$lb/in.^2$ (force)	lb/ft^2 (force)	144	6.945×10^{-3}
	N/m^2	6894	1.4506×10^{-4}
lb/ft^2 (weight)	$lb/in.^2$ (weight)	6.945×10^{-3}	144
	gm/cm^2	0.4882	2.0482
	kg/m^2	4.882	0.2048
lb/ft^2 (force)	$lb/in.^2$ (force)	6.945×10^{-3}	144
	N/m^2	47.85	2.090×10^{-2}
lb/ft^3 (weight)	$lb/in.^3$ (weight)	5.787×10^{-4}	1728
	kg/m^3	16.02	6.243×10^{-2}
poundals	lb (force)	3.108×10^{-2}	32.17
	dynes	1.383×10^4	7.233×10^{-5}
	newtons	0.1382	7.232
slugs	lb (weight)	32.17	3.108×10^{-2}
	kg	14.594	0.06852
$slugs/ft^2$	kg/m^2	157.2	6.361×10^{-3}
tons, short (2,000 lb)	tonnes (1,000 kg)	0.9075	1.102
watts	ergs/sec	10^7	10^{-7}
	hp (550 ft-lb/sec)	1.341×10^{-3}	745.7

الملحق الثالث

ثبت بالمراجع الإضافية معدة حتى عام 1986

الكتب

D.S.Jones, *Acoustic and Electromagnetic Waves* (Uuniversity of Dundee, U.K., 1985).

E. Zwicker and M. Zollner, Elektroakustik, Hochschuktext (Springer-Verlag, Berlin, New York, 1984).

S. Temkin, Elements of acoustic (Wiley, New York, 1982).

L.E. Kinsler, A.R.Frey, A.B Coppens, and J.B. Sanders, Fundamentals of Acoustics, 3rd Ed. (Wiley, New York, 1982) .

M. Heckl and H. A. Mueller, Taschenbuch der technischen akustik (Springer-Verlag, Berlin, 1975).

J. R. pierce, almost all about waves (MIT press, Cambridge, MA, 1974).

الأبحاث

E. Meyer and E. Neumann, physical and applied acoustics (Academic press, New York, 1972).

E. Skudrzyk, Foundations of Acoustics (springer-verlag,vienna, 1971).

W. Reichert,grundlagen der technischen akustik (Akademische verlags gesellschaft geest und portig K. G., Leipzig,1968).

R. W. B. Stephens and A. E. Bate, Acoustics and vibrational physics (Edward Arnold, London, 1966).

C. M. Harris, "Absorption of sound in air versus humidity and temperature," J. Acoust. Soc. Am. 40, 148-159 (1966)

الباب الثالث

الكتب

J. Merhaut, Theory of Electro acoustics (McGraw-Hill International, New York,1981).

H. F. Olson, dynamical analogies, 2nd Ed. (van Nostrand, New York, 1958).

F. V. Hunt, electro acoustics (Wiley, New York, 1954).

الابحاث

L. L. Beranek, "some Remarks on Electro-mechano-Acoustical circuits," L. Acoust. soc. Am. 77, 1309-1313 (1985).

Z. Jagodzinski , "adequacy of Equivalent circuits for piezomagnetic Transducers," Acustica 21.283-287 (1969); see also," comments" by R. S. Wollett and Y. Yumamoto, 23,351-355(1970) and "Replies," 23,355-361 (1970) and 24, 175 (1971)

الباب الرابع

الكتب

L. cremer and M. Heckl, Koperschall (springer-verlag. Berlin, 1967).

F. A. Fischer, Fundamentals of electroacoustics (Interscience, London, 1955).

الابحاث

G. R. Harris, "transient field of a baffled plane piston having an Arbitrary vibration amplitude distribution, " *J. Acoust. Soc. Am* 70, 186-204 (1981).

P. R. Stepanishen, "Radiation Impedance of a Rectangular piston," *J. sound Vib*. 55, 275-288 (1977).

G. F. Lin, "acoustic Radiation from point excited Rib-reinforced plate, " *J. Acoust. Soc. Am*. 62,72-83 (1977).

M. C. Gomperts, "sound Radiation from baffled, thin Rectangular plates,"Acustica 37, 93-102 (1977).

H. Heckl, "abstrahlung von ebenen schallquellen," *Acustica* 37, 155-166 (1977).

G. C. Lauchle, "Radiation of sound from a small loudspeaker located in circular baffle, "*J. Acoust. Soc. Am.* 57, 543-549 (1975).

C. E. Wallace," Radiation Resistance of a Rectangular panel, " *J. Acoust. Soc . Am* . 51 , 946-952 (1970).

D. C. greene, "vibration and sound radiation of damped and un-damped flat plates, " *J. Acoust. Soc . Am* . 33, 1315-1320 (1961).

R. L. Pritchard, "mutual Acoustic Impedance Between Radiators in an infinite rigid plane, " *J. Acoust. Soc. Am.*. 32, 730-737 (1960).

R. L. Lyon," On The Low Frequency Radiation load of a Bass-Reflex Speaker, " *J. Acoust. Soc. Am.* 29,654 (1957)

R. V. Waterhouse, "output of a Sound source in a Reverberation Chamber and Other Reflecting Environments, " *J. Acoust. Soc. Am.*. 30, 4-13 (1958).

U. Ingard and G.L. Lamp, "Effect of a reflecting plane on the Power Output of Sound sources, " *J. Acoust. Soc. Am.*. 29, 743-744-744 (1957).

الباب الخامس

الكتب

J. Merhaut, Theroy of Electroacoustics (*McGraw-hill, New York*,1980).

F. A. Fischer, Fundamentals of Electro acoustics (Interscience, London, 1955).

الابحاث

Olaf Jacobsen, "some Aspect of the self and mutual Radiation Impedance Concept with Respect to Loudspeakers, "*J. Audio Eng. Soc*. 24, 82-92 (1976).

M. Mongy, "Acoustical properties of porous materials, " *Acustica* 28, 243-247 (1973).

J. Merhaut, "Contribution to the Theory of Electroacoustic Transducers Based on Electrostatic principle, " *Acustica* 19, 283-292 (1967/68).

الباب السادس

الكتب

M. L. Gayford, Electroacoustic—Microphones, Earphones and loudspeakers (*American Elsevier, New York*, 1971).

F. A. Fisher, Fundamentals of electroacoustics (*Interscince, London*, 1955).

H. F. Olson, Acoustical Engineering (*Van Mostrand, New York*, 1957).

F. V. Hunt, Electroacoustics (*Wiley, New York*, 1954).

الابحاث

J. L. Flangan and R. A. Kubli, "conference Microphone with Adjustable Directivity, *J. Acoust. Soc. Am*. 77, 1946-1949 (1985) .

R. Lerch, "electroacoustic Properties of piezopolymer microphones," *J. Acoust. Soc. Am.* 69, 1809-1814 (1981).

R. Zahn, "analysis of the Acoustic Response of circular Electret Condenser microphones, " *J. Acoust. Soc . Am* 69, 1200-1203 (1981); also *Acustica* 57, 191-300 (1985).

A. J. Zuckerwar, "Theoretical Response of Condenser Microphone, " *J. Acoust. Soc . Am.* 68, 1278-1285 (1978).

J. Ohga, S. Shirai , O. Ochi , T. Takagi, A. Yoshikawa, H. Nagai, and Y. Mizushima , "Granule Microphone Using Selenium-Tellurium alloy, " J. G. R. Hruska, E. B. Magran and W. B. Penzes, "environmental effect on microphones of various constructions, " *J. Acoust. Soc . Am. 61*, 206-210 (1977); also 62 , 1315 (1977).

W.R Kundert, " Comments on Hruska et al. Paper, " *J. Acoust. Soc . Am.* 61,1647 (1977).

D. P. Egoff, "Mathematical modeling of Probe-Tube Microphone, " *J. Acoust. Soc . Am.* 61 , 200-205 (1977).

G. G. parfitt and B. N. Gayang , " New Form of Condenser Microphone," *Acustica* 37, 125-126 (1977).

G. M. Sessler and J. E Wesr, " Electret Microphones, " a series of papers, J. Acoust. Soc . Am. 35, 1354-1357 (1963); 40, 1433-1440 (1966) ;46, 1081-1086 (1969); and 58, 273-278 (1975).

E. Villchur and M. C. Killion, "probe-Tube Microphone Assembly, " *J.*

Acoust. Soc . Am. 57, 238-240 (1975).

J. S. Wang and M. J. Crocker, "Tubular Windscreen Design for microphones for in-Duct Fan Sound Power Measurements for Electret microphones, " *J. Acoust. Soc . Am.* 53, 1616-1619 (1973).

C. W. Reedyk, "Noise Canceling Electret microphone for light-weight head Telephone sets, " *J. Acoust. Soc . Am.*53, 1609-1615 (1973).

F. W. Fraim, P. V. Murphy, and R. J. Ferran "electrets in Miniature microphones, " *J. Acoust. Soc . Am.* 1601-1608 (1973).

J. L. Collins and G. E. Ellis ,"Electro kinetic, Acoustic Pressure Transducer, " *J. Acoust. Soc . Am.* 36, 1808-1860 (1964).

الباب السابع

الكتب

Loudspeakers: An Anthology of Articles on loudspeakers from the pages of the journal of the audio engineering society vols. 1-25,(1953-1977)

(Audio engineering society, 60 E.42nd street, New York, NY 10017, 1978) . A partial list of the articles contained pertinent to this chapter is: Analysis of decoupled-cone loudspeakers, J. M. Kates (Jan / Feb1977)

Radiation from a Dome, J. M. Kates (Nov 1976)

Low-Frequency Loudspeakers assessment by Near-field sound-pressure measurement, D. B. Keele, jr. (Apr1976)

Gradient Loudspeakers, H. F. Olson (Mar 1973)

Modulation Distortion in Loudspeakers, P. W. Klipsch, part III, (dec 1972) ; Part II (Feb 1970); Part I (Apr 1969)

Simplified Loudspeakers measurement at Low Frequencies, R. H. Small, (Jan/Feb 1972)

Development of a sandwich construction Loud Speaker system, D. A. Barlow (June 1970)

Experimental Determination of low-frequency Loudspeaker Parameters, J. R. Ashley and M. D. Swan (Oct 1969)

Loudspeaker Phase Characteristics and phase Distortion, R. C. Heyser, part 1 and 2 (Jan and Apr. 1969)

High-Power, Low-Frequency Loudspeaker, J. K. Hiliard (july 1965_

Low-Frequency Response and Efficiency Relationships in Direct-Radiator Loudspeakers System, R. F. Allison (Jan 1965)

Trends in Loudspeaker Magnet Structures, R. J. Parker (July 1964) Interrelation of Speaker and Amplifier Designe, V. Brociner and D. R. von Recklinghasen (Apr 1964)

A Method of Testing Loudspeakers with Random Noise Input, E. M. Villchur (Oct 1962)

Application of Negative Impedance Amplifiers to Loudspeakers systems, R. E. Werner and R. M. Carrell (oct 1958)

An Electrostatic Loudspeaker Development, A. A. Janszen (Apr 1955)

Recent Developments in Direct-Radiator High Fidelity Loudspeakers, H.F. Olson, J. Preston and E. G. May (Oct 1954).

A. P. Dowlind and J. E. Fowcs-Williams, Sound and Source of Sound (Wiley , New York, 1983).

T. F. Heuter and R. H. Bolt, Sonics (Wiley, New York, 1955) .

الابحاث

R. A. Greiner and T. M. Sims, Jr., "Loudspeaker Distortion Reduction,"

J. Audio Eng. Soc . 32, 956-963 (1984).

L. J. van der Pauw, "The Trapping of Acoustic Energy by a Conical Memberane and it's Implications for Loudspeaker Cones, "J. Acoust. Soc. Am. 68, 1163-1168 (1980).

D. A. Kleinman and D. F. Nelson, "The Photophone –an Optical Telephone

Reciver, "*J. Acoust. Soc. Am*. 59, 1482-1494 (1976); 60, 240-250 (1976).

J. E. Benson, "Synthesis of High-Pass Filtered Loudspeaker Systems,"

A W A tech. Rev. 15,115-128 (1974); also 15, 143-148 (1974) and 16, 1-11 (1975).

D. F. Nelson, K. W. Wecht, and D. A. kleinman, "Photophone Performance, "*J. Acoust. Soc. Am*. 60, 251-255 (1976).

الباب الثامن

الكتب

Loudspeakers: An Anthology, Chapter 7 Bibliography. A partial list of articles pertinent to this chapter is ;

The Use of Fibrous Materials in Loudspeaker Enclosures, L. J. S. Bradbury (Apr 1976)

Vented-box Loudspeaker Systems, R. H. Small, Past I through IV, (Jun-Oct 1973)

Closed-box Loudspeaker System, R. H. Small, Past I through II (Dec and Jan/Feb 1973)

Loudspeakers in Vented Boxes, A. N. Thiele, Parts I and II (May and Jun 1971)

Phase and delay distortion in multiple-driver Loudspeaker Systems, R. H. Small (Jan 1971)

Loudspeaker Enclosure Walls, P. W. Tappan (Jul 1962)

Corner Loudspeaker Placement, P. W. Klipsch (Jul 1959)

Performance of Enclosures for Low-Resonance, High-Compliance Loudspeakers, J. F. Novak (Jan1959)

Problems of bass Reproduction in Loudspeakers, E. M. Villchur (Jul 1957)

الابحاث

W. M. Leach, Jr. "Active Equalizaton of Closed-Box Loudspeaker Systems, "*J. Audio Eng. Soc*. 29, 405-407 (1981).

A. D. Broadhurst,, "Loudspeakers Enclosure to Simulate an Infiniti Baffle," *Acustica* 39, 316-322 (1978).

J. R. Macdonald, "Loudspeakers, " J. Electrochem soc. 124, 1022-1030 (1977)

الباب التاسع

الكتب

Loudspeakers: An Anthology, Chapter 7 Bibliography. The papers contained therein that are pertinent to this chapter include:

Horn-Loaded Electrostatic Loudspeker, J. Merhaut (Nov 1971)

Design Factors in Horn-Types Speakers, D. J. Plach (Oct 1953).

الابحاث

S. Morita, N. Kyouno, T. Yamabuchi, Y. Kagawa, and S. Sakai, "acoustic Radiation of a Horn Loudspeaker by The Finite Element Method,"J. Audio End. Soc. 28, 482-489 (1980); see also, W. M. Leach, Jr., "coonets" and S. Morita, et al., "reply," 28, 900 (1980) . Also see 30, 896-905 (1982) .

P. W. Klipsch, " a Low Frequency horn of Small Dimensions , " *J. Audio Eng. Soc.* 27, 141-148 (1979).

W. M. Leach, Jr., "Specification of Moving-Coil Drivers for Low-Frequency Horn-Loaded Loudspeakers, " J. Audio Eng. Soc. 27, 950-959 (1979) .

R. W. Pyler, jr., "effective Length of Horns," *J. Acoust. Soc. Am*. 57,1309-1317 (1975)

الباب العاشر

الكتب

Y. Ando, *Concert Hall Acoustics* (Springer-Verlag, Berlin and New York, 1985).

L. Cremer and H. A. Mueller, *Principals and Applications of Room Acoustics. Vols.1&2*, Translated by T. J. Schultz (Applied Science, London and New York, 1982).

H. Kuttruff, *Room Acoustics*, 2nd Ed. (Update, New York, 1981).

N. A. Grundy *et al.*, *Practical building Acoustics* (Halsted, Wiley, New York, 1976).

V. S. Mankovsky, *Acoustics of Studios and Auditoria*, edited by C. Gilford (Hastings House, New York, 1971).

M. D. Egan, *Concepts in Architectural Acoustics* (McGraw-Hill, New York, 1972).

L. Beranek, *Music, Acoustics, and Architecture* (Wiley, New York, 1962).

المراجع

R. N. Miles, "Sound Field in Rectangular Enclosure With Diffusely Reflecting Boundaries," *J. Sound Vib*. 92, 203-226 (1984).

M. Kleiner, "Audience Induced Background Noise Level in Auditoria," *Acustica* 46, 82-88 (1980).

M. H. Jones, "Reverberation Enforcement _ an Electro-Acoustical system," *Acustica* 27, 357-363 (1972).

R. J. Hawkes and H. Douglas, "Subjective Acoustic experience in Concert Auditoria," *Acustica* 24, 235-250 (1971).

G. G. Sacerdote, "A Recent Story of the Ceiling of the Scala Theatre of Milan," *Acustica* 22, 54-58 (1969-70).

H. Kuttruff and M.J. Jusofie, "Messungen des Nachhallverlaufes in mehreren Raumen, ausgefuehrt nach dem Verfahren der intergrierten Impulsantwort," *Acustica* 21, 1-9 (1969).

C. M. Harris, "Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature," *J. Acoust. Soc Am*. 40, 148-159 (1966).

الباب الحادي عشر

الكتب

J. D. Erwin and E. R. Graf, *Industrial Noise and Vibration Control* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1979).

R. G. White and J. G. Walker, *Noise and Vibration* (Wiley, New York, 1982).

D. Reynolds, *Engineering Principles of Acoustics: Noise and Vibration Control* (Allyn and Bacon, Boston, MA, 1981).

H. Lord, W. S. Gatley and H. A. Evensen, *Noise Control for Engineers* (McGraw-Hill, New York, 1980).

Handbook of Noise Control, 2nd Wd., edited by C. M. Harris (McGraw-Hill, New York, 1979).

Shock and Vibration Handbook, 2nd Ed., edited by C. M. Harris and C. E. Crede (McGraw-Hill, New York, 1976).

E. B. Magrab, *Environmental Noise Control* (Wiley, New York, 1975).

Noise and Vibration Control for Industrialists, edited by S. A. Petrusewicz and D. K. Longmore (American Elsevier, New York, 1974).

Noise and Vibration Control Engineering, edited by M. J. Crocker (Purdue U., Lafayette, Indiana, 1972).

W. T. Thompson, *Theory of Vibration with Applications* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1973).

Noise and Vibration Control, edited by L. Beranek (McGraw-Hill, New York, 1971).

Noise Reduction, edited by L. Beranek (McGraw-Hill, New York, 1961).

P. H. Parkin and H. R. Humphreys, *Acoustics, Noise and Buildings* (Praeger, New York, 1959).

الباب الثانى عشر

الكتب

A. P. G. Peterson, *Handbook of Noise Measurement* (GenRad, Concord, MA, 1974).

المراجع

M.A.N. de Araujo and S. N. Yousri Gerges, "Sound Power From Sources Near

Reverberation Chamber Boundaries," *J. Sound Vib*. 91, 471-477 (1983).

K. Bodlund, "Sound Power in Reverberation Chambers at Low Frequencies," *J. Sound Vib*. 55, 563-590 (1977).

K. Bodlund, "Diffusion in Reverberation Chambers," J. Sound Vib. 50, 253-283 (1977).

T. E. Vigran and S. Sorsdal, "Comparison of Methods for Measurement of Reverberation Time," *J. Sound Vib*. 48, 1-13 (1976).

الباب الثالث عشر

الكتب

R. P. Hamerick, D. Henderson, and R. Salve, *New Perspective on Noise Induced Hearing Loss* (Raven, New York, 1982).

P. E. Cunniff, *Environmental Noise Pollution* (Wiley, New York, 1977).

D. Henderson, R. P. Hamerick, D. S. Dosanijh, and J. H. Mills, *Effects of Noise on Hearing* (Raven, New York, 1976).

S. Williams, Jr., E. Leyman, S. A. Karp, and P. T. Wilson, *Environmental Pollution and Mental Health* (Information Resources, Washington, D.C., 1973).

Effects of Noise on Hearing, edited by D. Henderson, R. P. Hamernik, D. S. Dosanjh, and J. H. Mills (Raven, New York, 1976).

المراجع

N. Broner and H. G. Leventhall, "Modified PNdB for Assessment of Low Frequency Noise," *J. Sound Vib*. 73, 271-277 (1980); also 84, 443-448 (1982).

T. J. Schultz, "Synthesis of Social Surveys on Noise Annoyance," *J. Acoust. Soc. Am.* 64, 377-405 (1978); also, 65, 849 (1979).

V. J. Krichagin, "Health Effects of Noise Exposure," J. Sound Vib. 59, 65-71 (1978).

G. J. Thiessen, "Disturbance of Sleep by Noise," *J. Acoust. Soc. Am.* 64, 261-222 (1978).

C. Hayashi, S. Kondo, and H. Kodama, "Psychological Assessment of Aircraft Noise Index," *J. Acoust. Soc. Am*. 63, 815-822 (1978).

F. J. Langdon and I. B. Buller, "Road Traffic Noise and Disturbance to Sleep," *J. Sound Vib.* 50, 13-28 (1977).

M. A. Jenkins and J. Pahl, "Measurement of Freeway Noise and Community Response," *J. Acoust. Soc. Am*. 58, 1222-1231 (1975).

J. S. Lukas, "Noise and Sleep," *J. Acoust. Soc. Am.* 58, 1232-1242 (1975).

B. Berglund, U. Berglund, and T. Lindvall, "Scaling Loudness, Noisiness and Annoyance of Aircraft and Community Noise," *J. Acoust. Soc. Am*. 57, 930-934 (1975); also 60, 1119-1125 (1976).

J. D. Miller, "Effects of Noise on People," *J. Acoust. Soc. Am*. 56, 729-764 (1974).

A. Gabrielson, U. Rosenberg, and H. Sjogren, "Judgements of Perceived Sound Quality of Sound-Reproducing Systems," *J. Acoust. Soc. Am.* 55, 854-861 (1974).

H. E. von Gierke and C. W. Nixon, "Human Response to Sonic Boom," J. Acoust. Soc. Am. 51, 766-782 (1972).

L. L. Beranek, "Preferred Noise Criteria," *J. Acoust. Soc. Am.* 50, 1223-1228 (1971); See also 28, 833-852 (1956).

C. E. Williams, K. S. Pearsons, and M.H.L. Hecker, "Speech Intelligibility in the Presence of Time-Varying Aircraft Noise," *J. Acoust. Soc. Am.* 50, 426-434 (1971).

J. C. Webster, "Speech Communications as Limited by Ambient Noise," *J. Acoust. Soc. Am.* 37, 692-699 (1965).

R. W. Young, "Single - Number Criteria for Room Noise," *J. Acoust. Soc. Am.*

36, 289-295 (1964).

مسرد للمصطلحات

مرتب طبقا للأبجدية الإنجليزية

Absorption coefficient α	معامل الامتصاص α
Acoustic circuit for filter,	الدائرة الصوتية لمرشح
Acoustic flow,	تدفق صوتى
Acoustic fluid,	سائل (مائع) صوتى
Acoustic frictional,	احتكاك صوتى
Acoustic resistance,	مقاومة صوتية
Acoustic sources,	مصادر صوتية
Acoustical compliance	مطاوعة صوتية
Acoustical equations,	معادلات صوتية
Acoustical impedances,	معاوقة صوتية
Acoustical mobility,	حركية صوتية
Acoustical ohm,	أوم صوتي
Acoustical relations,	علاقات صوتية
Acoustical tiles,	بلاط صوتي
Acoustical transformers,	محولات صوتية
Air losse,	فقد الهواء
Ambient (background) noise	ضوضاء البيئة (الخلفية)
American Standard,	المعيار الأمريكي
Anatomy of Ear,	تشريح الأذن
Anechoic field,	مجال عديم الصدى
Angle of incidence,	زاوية السقوط
Articulation index,	دليل تمفصل الكلام (الفصاحة)
Attenuation,	اضمحلال (توهين)
Auditorium noise,	ضوضاء صالة
Auditory canal,	قناة سمعية
Auxiliary transducer	محول طاقة إضافي
Background noise effect on reading,	تأثير ضوضاء خلفية على القراءة
Backward-traveling wave,	موجة متراجعة
Baffle constants,	ثوابت المانع (الخشخشة)
Baffle,	صفائح تبريد أو خشخشة
Bandwidt,	عرض الحزمة
Barium titanate,	تيتانات الباريوم

Barriers,	عوائق
Basilar membrane,	غشاء قوقعة الأذن
Bass quality,	جودة التمييز الترددى (الباز)
Bass-reflex baffles,	موانع تمييز تردد – أنكاسى
Beam width,	عرض الشعاع
Bender Bimorph,	ثنائى الشكل المثنى
Bessel functions,	دوال بسيل
Beta (β) operator,	مؤثر بيتا
Bimorph,	ثنائى الشكل
Boundary conditions,	شروط حدية
Box,	صندوق
Brick partitions,	حواجز من الطوب أو الحجر
Building materials absorption coefficient	معامل امتصاص مواد البناء
Building materials,	مواد بناء
Cabinet for loudspeakers,	دولاب للسماعات
Cables of microphones,	كابلات الميكروفونات
Capacitance microphones,	ميكروفونات المكثف
Cavity,	تجويف (فجوة)
Cellufoam,	اسفنج رغوى
Cellular horn,	بوق عالى الذبذبة
Ceramic microphone,	ميكروفون سيراميكي
Characteristic impedance,	معاوقة مميزة
Charles-Boyle gas law,	قانون شارلى – بويل للغاز
Churcher-King contours,	كنتورات تشورشير–كينج
Circuit direct-radiator,	دائرة مشعاع – مباشر
Circuit for acoustic transformer	الدائرة الصوتية لمحول الطاقة
Circuit for closed tube	دائرة أنبوبة – مغلقة
Circuit for horn,	دائرة بوق
Circuit for loudspeaker in bass-reflex baffle,	دائرة لسماعة فى مانع تمييز ترددى – إنعكاسي
Circuit for microphone	دائرة ميكروفون
Closed tube,	أنبوبة مغلقة
Closed-box baffle,	حاجز صندوق – مغلق
Cochlea,	قوقعة الأذن
Cochlear partition,	تقسيم قوقعة الأذن
Coefficients of absorption,	معاملات الامتصاص

Coefficients of noise,	معاملات الضوضاء
Conversion factors,	معاملات تحويل
Conversion from mobility to impedance analogies,	تحويل من التناظر الحركى إلى المعاوقى
Conversion of octave-band levels,	تحويل مستويات حزمة – أوكتاف
Conversion to critical-band levels,	تحويل مستويات حزمة – حرجة
Conversion to spectrum levels,	تحويل إلى مستويات طيف
Criteria for noise control,	معيار السيطرة على الضوضاء
Critical bandwidths	عرض حزم حرج
Crystal structure,	تركيب بلورى
Decay curves for sound,	منحنيات الاضمحلال للصوت
Decibel conversion tables,	جداول تحويل الديسيبل
Decibel conversion,	تحويل الديسيبل
Densities,	كثافات
Density of air	كثافة الهواء
Density of materials,	كثافة المواد
DI (directivity index),	دليل التوجيهية
Diameter of diaphragm	قطر الحجاب الحاجز
Differential sensitivity	حساسية تفاضلية
Diffraction of sound-level meter	تشتت مقياس مستوى – الصوت
Diffuse field,	مجال مستفيض (متخلل)
Direct-radiator loudspeakers,	سماعات المشعاع – المباشر
Direct field,	مجال مستمر (مباشر)
Direct sound,	صوت مستمر (مباشر)
Direct speech,	تخاطب (حديث) مباشر
Directional microphones array,	مصفوفة ميكروفونات موجهة
Directivity	توجيهية
Directivity characteristics	مميزات التوجيهية
Directivity factor,	معامل التوجيهية
Directivity index (*see* DI)	دليل التوجيهية
Directivity patterns,	نماذج توجيهية
Dispersion of sound,	انتشار الصوت
Displacement,	إزاحة
Distortion,	تشوه
Doors transmission loss,	فقد الانتقال خلال الأبواب
Doublet microphone source,	مصدر ميكروفون مزدوج

Draperies,	أقمشة
Driving units	وحدات دافعة
Ducts,	أنابيب (قنوات)
Dynamic loudspeaker,	سماعة ديناميكية
Dynamic microphone,	ميكروفون ديناميكي
Ear canal,	قناة الإذن الخارجية
Eardrum,	طبلة الأذن
Earphone,	سماعة أذن
Echo,	صدى
Effective length of tube,	الطول الفعال للأنبوبة
Effective particle velocity,	سرعة الصوت الفعالة
Effective sound pressure,	ضغط الصوت الفعال
Effective volume velocity,	السرعة الحجمية الفعالة
Effective,	فعال
Efficiency,	كفاءة
Electromagnetic loudspeakers,	سماعات كهرومغناطيسية
Electromagnetic microphones,	ميكروفونات كهرومغناطيسية
Electromagnetic-mechanical transducers,	محولات طاقة كهرومغنيطو–ميكانيكية
Electromechanical transducers,	محولات طاقة كهروميكانيكية
Electrostatic microphones,	ميكروفونات كهروستاتيكية
Electrostatic-mechanical transducers,	محولات طاقة كهروستاتيكية–ميكانيكية
Elements of circuits,	عناصر الدوائر
End corrections,	تصحيحات النهاية
Energy density,	كثافة الطاقة
Energy flux,	فيض الطاقة
Engine noise,	ضوضاء المحرك
Equal-loudness contours,	كنتورات تساوى – الصخب
Expander plates,	ألواح متسعة
Exponential connector,	موصلات أسية
Exponential function,	دالة أسية
Exponential horn,	أبواق أسية
External ear,	أذن خارجية
Eyring-Norris equation,	معادلة إيرنج–نوريز
Far field,	مجال بعيد
Feeling,	شعور
Fiberglas blanket,	بطانة ليف زجاجى

Fiberglas board,	لوحة ليف زجاجى
Fiberglas wedge,	وتد ليف زجاجى
Finite-sized baffle,	حاجز محدد – الحجم
Flanged tubs,	أنابيب بشفة (مشفهة)
Flare constant,	ثابت نهاية البوق
Flow resistance,	مقاومة التدفق
Fluctuating sounds measurement,	قياس تأرجح الأصوات
Flux density measurement for loudspeakers	قياس كثافة الفيض للسماعات
Folded horn,	بوق مطوى
Force ,	قوة
Forced vibrations,	اهتزازة قسرية
Forward-traveling wave,	موجة متقدمة
Free field,	مجال حر
Friction in air,	احتكاك في الهواء
Fundamental frequency	تردد الأساس (أساسى)
Gas constants,	ثوابت الغاز
Generators,	مولدات
Gradient microphones,	ميكروفونات التدرج (الميل)
Gram-molecular weight,	الوزن الجزيء الجرامي
Graphic-level recorder,	مسجل المستوى –البيانى
Graphic-level,	المستوى –البيانى
Harmonic distortion,	تشوه توافقى
Helmholtz resonator,	مرنان هيلموتز
Hemispherical radiation,	إشعاع نصف كروى
Horn loudspeakers,	سماعات البوق
Horns,	أبواق
Humidity effects	تأثيرات الرطوبة
Huygens wavelets,	مويجات هيجينز
Hydrostatically sensitive microphones,	ميكروفونات ضغط هيدروستاتيكي
Infinite baffle,	حاجز لانهائى
Inner ear,	أذن داخلية
Instantaneous,	لحظى
Intelligibility of speech,	وضوح التخاطب (الحديث)
Intensity,	شدة
Isolation of vibration,	عزل الاهتزاز

Kapok,	قطن كاذب (شعر بذور شجر الكابوك)
Kinematic coefficient of viscosity,	معامل اللزوجة الكينماتيكى
Levers	روافع
Line microphones,	ميكروفونات مبطنة
Linguistic factors,	عوامل لغوية
Lining impedance,	معاوقة التبطين
Lining baffle-box,	حاجز صندوق مبطن
Linings in ducts,	بطانات فى القنوات
Listener's criteria of hearing,	معيار سمع المستمع
Listeners preferences,	تفضيلات المستمعين
Lithium sulphate,	كبريتات الليثيوم
Lobe	نتوء (شحمة الأذن)
Loudness function,	دالة الصخب
Loudness level,	مستوى الصخب
Loudness masking,	حجب الصخب
Loudness pitch,	خطوة (تدريج) الصخب
Loudness units,	وحدات الصخب
Loudness,	صخب
Loudspeakers compliance,	مطاوعة السماعات
Loudspeakers suspension,	تعليق السماعات
Loudspeakers,	سماعات
Machinery power levels,	مستويات قدرة المكائن
Magnetic-tape recorder,	مسجل رأس (شريط) – مغناطيسى
Magnetic-tape,	رأس (شريط) – مغناطيسى
Masking	حجب
Matrix impedance,	معاوقة المصفوفة
Maximum power available,	أقصى قدرة متاحة
Mean free path,	متوسط المسار الحر
Measurement,	قياسه
Mechanical circuits,	دوائر ميكانيكية
Mechanical compliance,	مطاوعة ميكانيكية
Mechanical elements,	عناصر ميكانيكية
Mechanical generators,	مولدات ميكانيكية
Mechanical impedance,	معاوقة ميكانيكية
Mechanical mass,	كتلة ميكانيكية
Mechanical ohm,	أوم ميكانيكي

Mechanical resistance,	مقاومة ميكانيكية
Mechano-acoustic transducers,	محولات طاقة ميكانوصوتية
Megaphone,	بوق توجيه الصوت (ميجافون)
Mel,	مِل
Membrane,	غشاء
Microbar,	ميكروبار
Microphones,	ميكروفونات
Middle ear,	الأذن الوسطى
Missing fundamental,	غياب التردد الأساس
Mks units,	وحدات النظام م كجم ث
mks,	م كجم ث
Mohm,	مأوم (أوم ميكانيكى)
Mole,	مول
Motion equation,	معادلة الحركة
Motional impedance,	معاوقة التحرك
Mounting of acoustical materials,	تعليق (تثبيت) المواد الصوتية
Mouth,	فُم
Moving-coil earphone,	سماعة أذن ملف–متحرك
Moving-coil loudspeaker,	سماعة ملف –متحرك
Moving-coil microphone,	ميكروفون الملف – المتحرك
Moving-coil transducers,	محول طاقة بملف – متحرك
Moving-coil,	ملف – متحرك
Muffler,	كاتم – صوت
Multicellular horns,	أبواق متعددة الخلية
Multiple loudspeakers,	سماعات متعددة
Natural frequency,	تردد طبيعى
Near field,	مجال – قريب
Networks,	شبكات
Newton's second law,	قانون نيوتن الثانى
Acceptable noise levels,	مستويات الصوت المسموحة
Noise measurement,	قياس الضوضاء
Noise of aircraft,	ضوضاء الطائرات
Noise reduction,	تخفيض الضوضاء
Noise-reduction coefficients	معاملات تخفيض – الضوضاء
Nomogram,	رسم بيانى
Nonlinear distortion,	تشوه غير – خطى

Nonlinearity in gases,	اللا–خطية فى الغازات
Normal frequencies,	الترددات الطبيعية
Normal mode of vibration,	نمط اهتزاز طبيعى
Normal threshold of audibility,	العتبة الطبيعية للمقدرة على السمع
Normal-frequency diagram,	مخطط التردد – الطبيعى
Objective noise meter,	مقياس ضوضاء فعال
Octave analyzers,	محللات أوكتاف
Open tube,	أنبوبة مفتوحة
Optimum reverberation time,	زمن الترداد الدقيق
Optimum room constant,	ثابت الغرفة الدقيق
Orchestra power levels,	مستويات قدرة الأوركسترا
Organ pipes,	أنابيب القيثارة
Ossicles,	عظيمات
Oval window,	نافذه بيضوية
Pain due to large sounds,	الألم نتيجة الأصوات العالية
Parabolic horn,	بوق القطع المكافئ
Parallel baffles,	صفائح متوازية
Particle,	جسيم
Particles displacement,	إزاحة الجسيم
Particles velocity,	سرعة الجسيم
Partitions in building,	التقسيمات فى المبانى
Perforated facings,	واجهات مثقبة
Perforated sheet,	لوح مثقب
Phon,	فون
Pick-up,	لاقط صوت / جرامافون
Piezoelectric coupling coefficient	معامل الربط الكهروضغطي
Piezoelectric microphone,	ميكروفون كهروضغطي
Piezoelectric substances,	مواد كهروضغطية
Piezoelectric transducers,	محولات طاقة كهروضغطية
Pipes junctions,	ملتقيات (وصلات) أنابيب
Piston impedance,	معاوقة مكبس
Piston in end of tube,	مكبس فى نهاية أنبوبة
Piston in infinite baffle,	مكبس فى حاجز لانهائى
Piston without baffle,	مكبس بدون حاجز
Piston directivity,	توجيهية المكبس
Pitch,	خطوة

Plane wave,	موجة مستوية
Plywood,	خشب رقائقى (مضغوط)
Point source,	مصدر نقطى
Polar diagram,	مخطط قطبى
Polarized sound wave,	موجة صوت مستقطبة
Porous materials,	مواد مسامية
Port constants,	ثوابت الميناء (الفتحة)
Port distortion,	تشوه الفتحة
Port size,	حجم الفتحة
Port,	ميناء أو فتحة أو بوابة
Power dissipated,	قدرة متبددة
Power efficiency,	كفاءة القدرة
Power levels,	مستويات القدرة
Power, active and reactive,	القدرة، الفاعلة و المفاعلة
Power-spectrum level,	مستوى طيف – القدرة
Pressure level,	مستوى الضغط
Pressure, ambient, atmosphere,	الضغط المحيط، الجوى
Pressure-spectrum level,	مستوى طيف – الضغط
Primary calculation,	حسابات أولية
Principal Axis,	محور مركز
Propagation constant,	ثابت الانتقال
Propeller noise,	ضوضاء مروحة هواء (منفاخ)
Psychoacoustic criteria,	معيار نفسصوتى
Psychoacoustic factors,	عوامل نفسصوتية
Psychological studies,	دراسات نفسصوتية
Public-address system,	شبكة مكبرات الصوت
Pulsating sphere,	كرة نابضة
Q_1 **of loudspeakers,**	Q_1 للسماعات
Q_1 **of perforated sheet,**	Q_1 للوح مثقب
Q_1 **of resonant circuits,**	Q_1 لدوائر مرنانة (رنين)
Q_1 **of sources,**	Q_1 للمصادر
Quartz,	كوارتز
Radiation directivity patterns,	نماذج توجيهية الإشعاع
Radiation from curved sources,	إشعاع من مصادر منحنية
Radiation from doublet,	إشعاع من مزدوج (ثنائى)
Radiation from free disk,	إشعاع من قرص حر

Radiation from hemispherical source,	إشعاع من مصدر نصف كروى
Radiation from Radios, audio system,	إشعاع من نظام راديو أو نظام سمعى
Radiation impedances,	معاوقات إشعاعية
Radiation receivers,	مستقبلات إشعاع
Ralye,	رايليى
Random noise,	ضوضاء غرفة
Randomly incident sound,	صوت ساقط بشكل عشوائى
Rate of sound decay,	معدل اضمحلال (وهن) الصوت
Reactance,	مفاعلة
Reciprocity calibration,	معايرة تبادل
Reciprocity principle,	مبدأ التبادل
Reciprocity theorem,	نظرية التبادل
Recorders,	مسجلات
Recording of data,	تسجيل البيانات
Recording of signals,	تسجيل للإشارات
Reduction of noise,	تخفيض الضوضاء
Reference intensity,	شدة مرجعية
Reference loudspeaker response,	استجابة سماعة مرجعية
Reference power available efficiency,	كفاءة القدرة المتاحة المرجعية
Reference power,	قدرة مرجعية
Reference sound pressure,	ضغط صوت مرجعى
Reference,	مرجع
Reissner's membrane,	غشاء ريزنر
Relative humidity,	رطوبة نسبية
Resistivity of crystals, metals, wire,	المقاومة النوعية للبلورات، للمعادن، للأسلاك
Resonance circuit,	دائرة رنين
Resonance curve,	منحنى رنين
Resonance frequency,	تردد رنين
Resonance of basilar membrane,	رنين غشاء القوقعة
Resonance of diaphragm,	رنين الحجاب الحاجز
Resonance of ear,	رنين الأذن
Resonance of rim,	رنين الإطار (الحافة أو البرواز)
Response of filters,	استجابة المرشحات
Response of horn,	استجابة البوق
Response of loudspeakers,	استجابة السماعات

Response of microphones,	استجابة الميكروفونات
Reverberant field,	مجال الترداد
Reverberant sound,	صوت الترداد (الصوت المرتد)
Reverberant-energy density,	كثافة طاقة الترداد (الطاقة المرتدة)
Reverberation of enclosures,	ترداد (انعكاس) الأوعية
Reverberation of living rooms,	ترداد حجرات المعيشة
Reverberation time,	زمن الترداد
Ribbon microphones circuit,	دائرة ميكروفونات الشريط
Ribbon microphones directivity,	توجيهية ميكروفونات الشريط
Rigidly closed tube,	أنبوبة مسدود بشكل صلب
Rim construction of loudspeakers,	بناء حافة السماعات
rms,	جذر متوسط المربعات
Rochelle salt,	ملح روشيل
Room constant,	ثابت غرفة
Rotational systems,	أنظمة دوارة
Sabin,	سابين
Schematic diagrams,	مخططات توضيحية
Self-noise in microphones,	ضوضاء – ذاتية فى الميكروفونات
Self-reciprocity,	تبادل ذاتى
Side lobe,	مسار جانبى
Silencers,	كاتمات صوت
Simple source,	مصدر بسيط
Slit impedance,	معاوقة الشق
Slow-scale,	مقياس – بطيء
Sone,	سون
Sound absorption	امتصاص صوت
Sound absorption coefficients of building materials,	معاملات امتصاص الصوت لمواد البناء
Sound absorption coefficients,	معاملات امتصاص الصوت
Sound absorption in air,	امتصاص الصوت فى الهواء
Sound absorption in materials,	امتصاص الصوت فى المواد
Sound coefficients,	معاملات الصوت
Sound density,	كثافة الصوت
Sound energy density,	كثافة الطاقة الصوتية
Sound energy,	طاقة صوتية
Sound Field,	مجال صوتي

Sound flux,	فيض صوتي
Sound intensity,	شدة صوتية
Sound level,	مستوى الصوت
Sound meters,	مقاييس صوتية
Sound pressure,	ضغط الصوت
Sound propagation,	انتشار (انتقال) الصوت
Sound stream absorber,	ماص تدفق صوتى
Sound transmission,	إرسال الصوت
Sound-amplification systems,	أنظمة تكبير – الصوت
Sound-pressure-level,	مستوى – ضغط – الصوت
Source function,	دالة الصوت
Specific acoustic impedance,	المعاوقة النوعية الصوتية
Specific heat of air,	الحرارة النوعية للهواء
Spectrum level measurement,	قياس مستوى الطيف
Spectrum level,	مستوى الطيف
Speech amplification systems,	أنظمة تكبير التخاطب (الحديث)
Speech articulation index,	دليل تمفصل (فصاحة) التخاطب
Speech intelligibility,	وضوح خطاب
Speech levels,	مستويات التخاطب
Speech peak and minimum,	ذروة و قاع التخاطب
Speech range,	مدى التخاطب
Speech reverberant,	ترداد التخاطب
Speech spectrum,	طيف التخاطب
Speech,	التخاطب (الحديث أو الخطاب)
Speech-level range,	مدى مستوى التخاطب
Spherical sources,	مصادر كروية
Spherical wave,	موجة كروية
Standing wave,	موجة موقوفة
Stationary wave,	موجة ساكنة
Steady state,	حالة ثابتة
Steady-state sound,	صوت الحالة – الثابتة
Stiffness,	الجسوء (الصلابة)
Strength of simple source,	شدة مصدر بسيط
Subjective judgments,	الأحكام الشخصية
Synthetic bass,	تمييز ترددى صناعى
Tables of absorption coefficients,	جداول معاملات الامتصاص

Telephone speech intelligibility in noise,	وضوح كلام التليفون فى وجود ضوضاء
Temperature corrections in rooms,	تصحيحات درجة الحرارة فى الغرف
Temperature effects on microphones,	تأثيرات درجة الحرارة على الميكرفونات
Temperature gradient,	ميل (تدرج) درجة الحرارة
Terrain losses,	فقد التضاريس
Theorems,	نظريات
Thermal diffusion wave,	موجة الانتشار الحرارى
Thevenin's Theorem,	نظرية ثيفينن
Thresholds audibility,	عتبات مقدرة السمع
Throat,	زور
Tickle due to loud sounds,	الدغدغة بسبب أصوات عالية
Tone bursts,	تفجرات النغمة
Tone control,	التحكم فى النغمة
Torque Bimorph,	ثنائى شكل عزم اللّي
Transducers calibration,	معايرة محول الطاقة
Transducers,	محولات الطاقة (نواقل الطاقة)
Transfer function,	دالة النقل
Transient behavior	سلوك عابر
Transmission coefficient,	معامل الانتقال (البث)
Transmission loss in air,	فقد البث فى الهواء
Transmission loss,	فقد البث
Transmission of single,	إرسال (بث) إشارة
Transmission paths,	مسارات الإرسال
Transmission through walls,	الإرسال خلال الجدران
Transverse wave,	موجة مستعرضة
Tubes,	أنابيب
Tweeter,	صوت عالى الذبذبة
Unbaffled loudspeaker,	سماعة بدون حاجز
Unflanged tubs,	أنابيب بدون حاجز
Units conversion,	تحويل الوحدات
Units of absorption,	وحدات الامتصاص
Vector wave equation,	معادلة متجه الموجة
Vector,	متجه
Velocity,	سرعة
Ventilating ducts,	قنوات (أنابيب) تهوية
Ventilating Fans,	مراوح تهوية

Viscosity coefficient,	معامل اللزوجة
Voice	صوت
Voice coil,	ملف صوت
Voice volume,	مستوى علو الصوت
Volume velocity,	سرعة حجمية
Walls,	جدران
Wave equation,	معادلة الموجة
Wave number,	العدد الموجى
Wavelength,	الطول الموجى
Weighting network,	شبكة (تعديل إفرازات) وزن
Weights of building materials,	أوزان مواد البناء
Weights,	أوزان
Window of ear,	نافذة الأذن
Woofer,	مجهار منخفض التردد (ويفر)

مسرد للمصطلحات

مرتب طبقا للأبجدية العربية

Q_1 of perforated sheet,	Q_1 للوح مثقب
Q_1 of resonant circuits,	Q_1 لدوائر مرنانة (رنين)
Q_1 of loudspeakers,	Q_1 للسماعات
Q_1 of sources,	Q_1 للمصادر
Horns,	أبواق
Exponential horn,	أبواق أسية
Multicellular horns,	أبواق متعددة الخلية
Acoustic frictional,	احتكاك صوتى
Friction in air,	احتكاك في الهواء
Subjective judgments,	الأحكام الشخصية
Middle ear,	الأذن الوسطى
External ear,	أذن خارجية
Inner ear,	أذن داخلية
Transmission of single,	إرسال (بث) إشارة
Sound transmission,	إرسال الصوت
Transmission through walls,	الإرسال خلال الجدران
Displacement,	إزاحة
Particles displacement,	إزاحة الجسيم
Response of horn,	استجابة البوق
Response of loudspeakers,	استجابة السماعات
Response of filters,	استجابة المرشحات
Response of microphones,	استجابة الميكروفونات
Reference loudspeaker response,	استجابة سماعة مرجعية
Cellufoam,	اسفنج رغوى
Radiation from free disk,	إشعاع من قرص حر
Radiation from doublet,	إشعاع من مزدوج (ثنائى)
Radiation from curved sources,	إشعاع من مصادر منحنية
Radiation from hemispherical source,	إشعاع من مصدر نصف كروى
Radiation from Radios, audio system,	إشعاع من نظام راديو أو نظام سمعى
Hemispherical radiation,	إشعاع نصف كروى
Attenuation,	اضمحلال (توهين)
Maximum power available,	أقصى قدرة متاحة

Draperies,	أقمشة
Pain due to large sounds,	ألم ناتج الأصوات العالية
Expander plates,	ألواح متسعة
Sound absorption in materials,	امتصاص الصوت فى المواد
Sound absorption in air,	امتصاص الصوت فى الهواء
Sound absorption	امتصاص صوت
Tubes,	أنابيب
Ducts,	أنابيب (قنوات)
Organ pipes,	أنابيب القيثارة
Unflanged tubs,	أنابيب بدون حاجز
Flanged tubs,	أنابيب بشفة (مشفهة)
Rigidly closed tube,	أنبوبة مسدود بشكل صلب
Closed tube,	أنبوبة مغلقة
Open tube,	أنبوبة مفتوحة
Sound propagation,	انتشار (إنتقال) الصوت
Dispersion of sound,	انتشار الصوت
Sound-amplification systems,	أنظمة تكبير – الصوت
Speech amplification systems,	أنظمة تكبير التخاطب (الحديث)
Rotational systems,	أنظمة دوارة
Forced vibrations,	اهتزازات قسرية
Weights,	أوزان
Weights of building materials,	أوزان مواد البناء
Acoustical ohm,	أوم صوتي
Mechanical ohm,	أوم ميكانيكي
Linings in ducts,	بطانات فى القنوات
Fiberglas blanket,	بطانة ليف زجاجي
Acoustical tiles,	بلاط صوتي
Rim construction of loudspeakers,	بناء حافة السماعات
Parabolic horn,	بوق قطع مكافئ
Megaphone,	بوق توجيه الصوت (ميجافون)
Cellular horn,	بوق عالى الذبذبة
Folded horn,	بوق مطوى
Background noise effect on reading,	تأثير ضوضاء خلفية على القراءة
Humidity effects	تأثيرات الرطوبة
Temperature effects on microphones,	تأثيرات درجة الحرارة على الميكرفونات
Self-reciprocity,	تبادل ذاتى

Cavity,	تجويف (فجوة)
Tone control,	التحكم فى النغمة
Decibel conversion,	تحويل الديسيبل
Units conversion,	تحويل الوحدات
Conversion of octave-band levels,	تحويل مستويات حزمة – أوكتاف
Conversion to critical-band levels,	تحويل مستويات حزمة – حرجة
Conversion to spectrum levels,	تحويل إلى مستويات طيف
Conversion from mobility to impedance analogies,	تحويل من التناظر الحركى إلى المعاوقي
Speech,	التخاطب (الحديث أو الخطاب)
Direct speech,	تخاطب (حديث) مباشر
Reduction of noise,	تخفيض الضوضاء
Acoustic flow,	تدفق صوتى
Reverberation of enclosures,	ترداد (انعكاس) الأوعية
Speech reverberant,	ترداد التخاطب
Reverberation of living rooms,	ترداد حجرات المعيشة
Fundamental frequency	تردد الأساس (أساسى)
Resonance frequency,	تردد رنين
Natural frequency,	تردد طبيعى
Normal frequencies,	الترددات الطبيعية
Crystal structure,	تركيب بلورى
Recording of data,	تسجيل البيانات
Recording of signals,	تسجيل للإشارات
Diffraction of sound-level meter	تشتت مقياس مستوى – الصوت
Anatomy of Ear,	تشريح الأذن
Distortion,	تشوه
Port distortion,	تشوه الفتحة
Harmonic distortion,	تشوه توافقى
Nonlinear distortion,	تشوه غير – خطى
End corrections,	تصحيحات النهاية
Temperature corrections in rooms,	تصحيحات درجة الحرارة فى الغرف
Mounting of acoustical materials,	تعليق (تثبيت) المواد الصوتية
Loudspeakers suspension,	تعليق السماعات
Tone bursts,	تفجرات النغمة
Listeners preferences,	تفضيلات المستمعين
Cochlear partition,	تقسيم قوقعة الأذن

Partitions in building,	التقسيمات فى المبانى
Synthetic bass,	تمييز ترددى صناعى
Directivity	توجيهية
Piston directivity,	توجيهية المكبس
Ribbon microphones directivity,	توجيهية ميكروفونات الشريط
Barium titanate,	تيتانات الباريوم
Propagation constant,	ثابت الانتقال
Optimum room constant,	ثابت الغرفة الدقيق
Room constant,	ثابت الغرفة
Flare constant,	ثابت نهاية البوق
Bimorph,	ثنائى الشكل
Bender Bimorph,	ثنائى الشكل المثنى
Torque Bimorph,	ثنائى شكل عزم اللّي
Gas constants,	ثوابت الغاز
Baffle constants,	ثوابت المانع (الخشخشة)
Port constants,	ثوابت الميناء (الفتحة)
Decibel conversion tables,	جداول تحويل الديسيبل
Tables of absorption coefficients,	جداول معاملات الامتصاص
Walls,	جدران
rms,	جذر متوسط المربعات
Stiffness,	الجسوء (الصلابة)
Particle,	جسيم
Bass quality,	جودة التمييز الترددى (الباز)
Closed-box baffle,	حاجز صندوق – مغلق
Lining baffle-box,	حاجز صندوق مبطن
Infinite baffle,	حاجز لانهائى
Finite-sized baffle,	حاجز محدد – الحجم
Steady state,	حالة ثابتة
Masking	حجب
Loudness masking,	حجب الصخب
Port size,	حجم الفتحة
Specific heat of air,	حرارة نوعية للهواء
Acoustical mobility,	حركية صوتية
Primary calculation,	حسابات أولية
Differential sensitivity	حساسية تفاضلية
Brick partitions,	حواجز من الطوب أو الحجر

Plywood,	خشب رقائقى (مضغوط)
Pitch,	خطوة
Loudness pitch,	خطوة (تدريج) الصخب
Circuit for acoustic transformer	الدائرة الصوتية لمحول الطاقة
Acoustic circuit for filter,	الدائرة الصوتية لمرشح
Circuit for closed tube	دائرة أنبوبة – مغلقة
Circuit for horn,	دائرة بوق
Resonance circuit,	دائرة رنين
Circuit for loudspeaker in bass-reflex baffle,	دائرة ســـماعة فى مانع تمييز ترددى – إنعكاسي
Circuit direct-radiator,	دائرة مشعاع – مباشر
Circuit for microphone	دائرة ميكروفون
Ribbon microphones circuit,	دائرة ميكروفونات الشريط
Exponential function,	دالة أسية
Loudness function,	دالة الصخب
Source function,	دالة الصوت
Transfer function,	دالة النقل
Psychological studies,	دراسات نفسصوتية
Tickle due to loud sounds,	الدغدغة بسبب أصوات عالية
DI (directivity index),	دليل التوجيهية
Directivity index (*see* DI)	دليل التوجيهية
Speech articulation index,	دليل تمفصل (فصاحة) التخاطب
Articulation index,	دليل تمفصل الكلام (الفصاحة)
Mechanical circuits,	دوائر ميكانيكية
Bessel functions,	دوال بسيل
Cabinet for loudspeakers,	دولاب للسماعات
Speech peak and minimum,	ذروة و قاع التخاطب
Magnetic-tape,	رأس (شريط) – مغناطيسى
Ralye,	رايليى
Nomogram,	رسم بيانى
Relative humidity,	رطوبة نسبية
Resonance of ear,	رنين الأذن
Resonance of rim,	رنين الإطار (الحافة أو البرواز)
Resonance of diaphragm,	رنين الحجاب الحاجز
Resonance of basilar membrane,	رنين غشاء القوقعة
Levers	روافع

Angle of incidence,	زاوية السقوط
Reverberation time,	زمن الترداد
Optimum reverberation time,	زمن الترداد الدقيق
Throat,	زور
Acoustic fluid,	سائل (مائع) صوتى
Sabin,	سابين
Velocity,	سرعة
Particles velocity,	سرعة الجسيم
Effective volume velocity,	السرعة الحجمية الفعالة
Effective particle velocity,	سرعة الصوت الفعالة
Volume velocity,	سرعة حجمية
Transient behavior	سلوك عابر
Loudspeakers,	سماعات
Horn loudspeakers,	سماعات البوق
Direct-radiator loudspeakers,	سماعات المشعاع – المباشر
Electromagnetic loudspeakers,	سماعات كهرومغناطيسية
Multiple loudspeakers,	سماعات متعددة
Earphone,	سماعة أذن
Moving-coil earphone,	سماعة أذن بملف–متحرك
Unbaffled loudspeaker,	سماعة بدون حاجز
Dynamic loudspeaker,	سماعة ديناميكية
Moving-coil loudspeaker,	سماعة صوتية بملف –متحرك
Sone,	سون
Networks,	شبكات
Weighting network,	شبكة (تعديل إفرازات) وزن
Public-address system,	شبكة مكبرات الصوت
Intensity,	شدة
Sound intensity,	شدة صوتية
Reference intensity,	شدة مرجعية
Strength of simple source,	شدة مصدر بسيط
Boundary conditions,	شروط حدية
Feeling,	شعور
Loudness,	صخب
Echo,	صدى
Baffles,	صفائح تبريد أو صفائح خشخشة
Parallel baffles,	صفائح متوازية

Box,	صندوق
Voice	صوت
Reverberant sound,	صوت الترداد (الصوت المرتد)
Steady-state sound,	صوت الحالة – الثابتة
Randomly incident sound,	صوت ساقط بشكل عشوائى
Tweeter,	صوت عالى الذبذبة
Direct sound,	صوت مستمر (مباشر)
Sound pressure,	ضغط الصوت
Effective sound pressure,	ضغط الصوت الفعال
Pressure, ambient, atmosphere,	الضغط المحيط، الجوى
Reference sound pressure,	ضغط صوت مرجعى
Self-noise in microphones,	ضوضاء – ذاتية فى الميكروفونات
Ambient (background) noise	ضوضاء البيئة (الخلفية)
Noise of aircraft,	ضوضاء الطائرات
Engine noise,	ضوضاء المحرك
Auditorium noise,	ضوضاء صالة
Random noise,	ضوضاء غرفة
Propeller noise,	ضوضاء مروحة هواء (منفاخ)
Sound energy,	طاقة صوتية
Eardrum,	طبلة الأذن
Effective length of tube,	الطول الفعال للأنبوبة
Wavelength,	الطول الموجى
Speech spectrum,	طيف التخاطب
Thresholds audibility,	عتبات مقدرة السمع
Normal threshold of audibility,	العتبة الطبيعية للمقدرة على السمع
Wave number,	العدد الموجى
Bandwidt,	عرض الحزمة
Beam width,	عرض الشعاع
Critical bandwidths	عرض حزم حرج
Isolation of vibration,	عزل الاهتزاز
Ossicles,	عظيمات
Acoustical relations,	علاقات صوتية
Elements of circuits,	عناصر الدوائر
Mechanical elements,	عناصر ميكانيكية
Barriers,	عوائق
Linguistic factors,	عوامل لغوية

Psychoacoustic factors,	عوامل نفسصوتية
Membrane,	غشاء
Reissner's membrane,	غشاء ريزنر
Basilar membrane,	غشاء قوقعة الأذن
Missing fundamental,	غياب التردد الأساس
Effective,	فعال
Doors transmission loss,	فقد الانتقال خلال الأبواب
Transmission loss,	فقد البث
Transmission loss in air,	فقد البث فى الهواء
Terrain losses,	فقد التضاريس
Air losse,	فقد الهواء
Mouth,	فُم
Phon,	فون
Energy flux,	فيض الطاقة
Sound flux,	فيض صوتي
Charles-Boyle gas law,	قانون شارلى – بويل للغاز
Newton's second law,	قانون نيوتن الثانى
Power dissipated,	قدرة متبددة
Reference power,	قدرة مرجعية
Power, active and reactive,	القدرة، الفاعلة و المفاعلة
Diameter of diaphragm	قطر الحجاب الحاجز
Kapok,	قطن كاذب (شعر بذور شجر الكابوك)
Ear canal,	قناة الإذن الخارجية
Auditory canal,	قناة سمعية
Ventilating ducts,	قنوات (أنابيب) تهوية
Force ,	قوة
Cochlea,	قوقعة الأذن
Noise measurement,	قياس الضوضاء
Fluctuating sounds measurement,	قياس تأرجح الأصوات
Flux density measurement for loudspeakers	قياس كثافة الفيض للسماعات
Spectrum level measurement,	قياس مستوى الطيف
Measurement,	قياسة
Cables of microphones,	كابلات الميكروفونات
Muffler,	كاتم – صوت
Silencers,	كاتمات صوت
Lithium sulphate,	كبريتات الليثيوم

Mechanical mass,	كتلة ميكانيكية
Densities,	كثافات
Sound density,	كثافة الصوت
Energy density,	كثافة الطاقة
Sound energy density,	كثافة الطاقة الصوتية
Density of materials,	كثافة المواد
Density of air	كثافة الهواء
Reverberant-energy density,	كثافة طاقة الترداد (الطاقة المرتدة)
Pulsating sphere,	كرة نابضة
Efficiency,	كفاءة
Power efficiency,	كفاءة القدرة
Reference power available efficiency,	كفاءة القدرة المتاحة المرجعية
Equal-loudness contours,	كنتورات تساوى – الصخب
Churcher-King contours,	كنتورات تشورشير-كينج
Quartz,	كوارتز
Nonlinearity in gases,	اللا-خطية فى الغازات
Pick-up,	لاقط صوت / جرامافون
Instantaneous,	لحظى
Perforated sheet,	لوح مثقب
Fiberglas board,	لوحة ليف زجاجى
mks,	م كجم ث
Beta (β) operator,	مؤثر بيتا
Sound stream absorber,	ماص تدفق صوتى
Mohm,	مأوم (أوم ميكانيكى)
Reciprocity principle,	مبدأ التبادل
Vector,	متجه
Mean free path,	متوسط المسار الحر
Near field,	مجال – قريب
Reverberant field,	مجال الترداد
Far field,	مجال بعيد
Free field,	مجال حر
Sound Field,	مجال صوتي
Anechoic field,	مجال عديم الصدى
Diffuse field,	مجال مستفيض (متخلل)
Direct field,	مجال مستمر (مباشر)
Woofer,	مجهار منخفض التردد (ويفر)

Octave analyzers,	محللات أوكتاف
Principal Axis,	محور مركز
Auxiliary transducer	محول طاقة إضافى
Moving-coil transducers,	محول طاقة بملف – متحرك
Transducers,	محولات الطاقة (نواقل الطاقة)
Acoustical transformers,	محولات صوتية
Electrostatic-mechanical transducers,	محولات طاقة كهروستاتيكية–ميكانيكية
Piezoelectric transducers,	محولات طاقة كهروضغطية
Electromagnetic-mechanical transducers,	محولات طاقة كهرومغنيطو–ميكانيكية
Electromechanical transducers,	محولات طاقة كهروميكانيكية
Mechano-acoustic transducers,	محولات طاقة ميكانوصوتية
Normal-frequency diagram,	مخطط التردد – الطبيعى
Polar diagram,	مخطط قطبى
Schematic diagrams,	مخططات توضيحية
Speech range,	مدى التخاطب
Speech-level range,	مدى مستوى التخاطب
Ventilating Fans,	مراوح تهوية
Reference,	مرجع
Helmholtz resonator,	مرنان هيلموتز
Side lobe,	مسار جانبى
Radiation receivers,	مستقبلات إشعاع
Sound-pressure-level,	مستوى – ضغط – الصوت
Graphic-level,	المستوى –البيانى
Loudness level,	مستوى الصخب
Sound level,	مستوى الصوت
Pressure level,	مستوى الضغط
Spectrum level,	مستوى الطيف
Pressure-spectrum level,	مستوى طيف – الضغط
Power-spectrum level,	مستوى طيف – القدرة
Voice volume,	مستوى علو الصوت
Speech levels,	مستويات التخاطب
Acceptable noise levels,	مستويات الصوت المسموحة
Power levels,	مستويات القدرة
Orchestra power levels,	مستويات قدرة الأوركسترا
Machinery power levels,	مستويات قدرة المكائن
Graphic-level recorder,	مسجل المستوى –البيانى

Magnetic-tape recorder,	مسجل رأس (شريط) - مغناطيسى
Recorders,	مسجلات
Transmission paths,	مسارات الإرسال
Acoustic sources,	مصادر صوتية
Spherical sources,	مصادر كروية
Simple source,	مصدر بسيط
Doublet microphone source,	مصدر ميكروفون مزدوج
Point source,	مصدر نقطى
Directional microphones array,	مصفوفة ميكروفونات موجهة
Loudspeakers compliance,	مطاوعة السماعات
Acoustical compliance	مطاوعة صوتية
Mechanical compliance,	مطاوعة ميكانيكية
Acoustical equations,	معادلات صوتية
Motion equation,	معادلة الحركة
Wave equation,	معادلة الموجة
Vector wave equation,	معادلة متجه الموجة
Eyring-Norris equation,	معادلةإيرنج-نوريز
Absorption coefficient α	معامل الامتصاص α
Transmission coefficient,	معامل الانتقال (البث)
Directivity factor,	معامل التوجيهية
Piezoelectric coupling coefficient	معامل الربط الكهروضغطي
Viscosity coefficient,	معامل اللزوجة
Kinematic coefficient of viscosity,	معامل اللزوجة الكينماتيكي
Building materials absorption coefficient	معامل امتصاص مواد البناء
Coefficients of absorption,	معاملات الامتصاص
Sound coefficients,	معاملات الصوت
Coefficients of noise,	معاملات الضوضاء
Sound absorption coefficients,	معاملات امتصاص الصوت
Conversion factors,	معاملات تحويل
Noise-reduction coefficients	معاملات تخفيض – الضوضاء
Sound absorption coefficients of building materials,	معاملات امتصاص الصوت لمواد البناء
Radiation impedances,	معاوقات إشعاعية
Lining impedance,	معاوقة التبطين
Motional impedance,	معاوقة التحرك
Slit impedance,	معاوقة الشق

Matrix impedance,	معاوقة المصفوفة
Specific acoustic impedance,	المعاوقة النوعية الصوتية
Acoustical impedances,	معاوقة صوتية
Piston impedance,	معاوقة مكبس
Characteristic impedance,	معاوقة مميزة
Mechanical impedance,	معاوقة ميكانيكية
Reciprocity calibration,	معايرة تبادل
Transducers calibration,	معايرة محول الطاقة
Rate of sound decay,	معدل اضمحلال (وهن) الصوت
American Standard,	المعيار الأمريكي
Criteria for noise control,	معيار السيطرة على الضوضاء
Listener's criteria of hearing,	معيار سمع المستمع
Psychoacoustic criteria,	معيار نفسصوتى
Reactance,	مفاعلة
Flow resistance,	مقاومة التدفق
Resistivity of crystals, metals, wire,	المقاومة النوعية للبلورات، للمعادن، للأسلاك
Acoustic resistance,	مقاومة صوتية
Mechanical resistance,	مقاومة ميكانيكية
Sound meters,	مقاييس صوتية
Slow-scale,	مقياس – بطيء
Objective noise meter,	مقياس ضوضاء فعال
Piston without baffle,	مكبس بدون حاجز
Piston in infinite baffle,	مكبس فى حاجز لانهائى
Piston in end of tube,	مكبس فى نهاية أنبوبة
Pipes junctions,	ملتقيات (وصلات) أنابيب
Rochelle salt,	ملح روشيل
Moving-coil,	ملف – متحرك
Voice coil,	ملف صوت
Directivity characteristics	مميزات التوجيهية
Resonance curve,	منحنى رنين
Decay curves for sound,	منحنيات الاضمحلال للصوت
Building materials,	مواد بناء
Piezoelectric substances,	مواد كهروضغطية
Porous materials,	مواد مسامية
Bass-reflex baffles,	موانع تمييز تردد – أنعكاسي

Thermal diffusion wave,	موجة الانتشار الحرارى
Stationary wave,	موجة ساكنة
Polarized sound wave,	موجة صوت مستقطبة
Spherical wave,	موجة كروية
Backward-traveling wave,	موجة متراجعة
Forward-traveling wave,	موجة متقدمة
Transverse wave,	موجة مستعرضة
Plane wave,	موجة مستوية
Standing wave,	موجة موقوفة
Exponential connector,	موصلات أسية
Mole,	مول
Generators,	مولدات
Mechanical generators,	مولدات ميكانيكية
Huygens wavelets,	مويجات هيجينز
Microbar,	ميكروبار
Moving-coil microphone,	ميكروفون الملف – المتحرك
Dynamic microphone,	ميكروفون ديناميكي
Ceramic microphone,	ميكروفون سيراميكي
Piezoelectric microphone,	ميكروفون كهروضغطي
Microphones,	ميكروفونات
Gradient microphones,	ميكروفونات التدرج (الميل)
Capacitance microphones,	ميكروفونات المكثف
Hydrostatically sensitive microphones,	ميكروفونات ضغط هيدروستاتيكي
Electrostatic microphones,	ميكروفونات كهروستاتيكية
Electromagnetic microphones,	ميكروفونات كهرومغناطيسية
Line microphones,	ميكروفونات مبطنة
Mel,	مِل
Temperature gradient,	ميل (تدرج) درجة الحرارة
Port,	ميناء أو فتحة أو بوابة
Window of ear,	نافذة الأذن
Oval window,	نافذه بيضوية
Lobe	نتوء (شحمة الأذن)
Theorems,	نظريات
Reciprocity theorem,	نظرية التبادل
Thevenin's Theorem,	نظرية ثيفينن
Directivity patterns,	نماذج توجيهية

Radiation directivity patterns,	نماذج توجيهية الإشعاع
Normal mode of vibration,	نمط اهتزاز طبيعى
Perforated facings,	واجهات مثقبة
Fiberglas wedge,	وتد ليف زجاجى
Units of absorption,	وحدات الامتصاص
Loudness units,	وحدات الصخب
mks units,	وحدات النظام م كجم ث
Driving units	وحدات دافعة
Gram-molecular weight,	الوزن الجزئي الجرامي
Intelligibility of speech,	وضوح التخاطب (الحديث)
Speech intelligibility,	وضوح خطاب
Telephone speech intelligibility in noise,	وضوح كلام التليفون فى وجود ضوضاء

سلطان

سلطان